Fachtagung

Qualifizierte Rekultivierungsschichten



Berichte aus der Forschung und Erfahrungen aus der Praxis

7. Dezember 2005
Landratsamt
Böblingen











Fachtagung

Qualifizierte Rekultivierungsschichten

7. Dezember 2005

Landratsamt Böblingen

Tagungsband

Herausgegeben von: Institut für Landespflege, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Prof. Dr. Werner Konold
Tennenbacher Str. 4
79106 Freiburg

Redaktion: Dr. Peter Wattendorf

Freiburg, Dezember 2005

Inhalt

Die Bedeutung von Rekultivierungsschichten für Deponien

Peter Bothmann, LfU Baden-Württemberg

Inhalt

1 Historie

Seit es Müllablagerungen gibt, hat man diese schon immer nach Beendigung der Verfüllung mit Erde bedeckt. In der Hauptsache wollte man damit die Ratten und das Ungeziefer vertreiben, den Geruch bekämpfen und auch den hässlichen Müll verstecken.

Ein weiterer Grund für die Erdabdeckung des Mülls war der Wunsch nach Folgenutzung des Geländes. So zum Beispiel die landwirtschaftliche Nutzung als Wiesen- oder Ackerflächen oder die forstliche Nutzung in Waldgebieten.

Bei der Errichtung der ersten geordneten Mülldeponien nach Einführung des Abfallbeseitigungsgesetzes 1973 war man vielfach versucht, die Deponien im Wald zu verstecken. Von den 47 zurzeit noch betriebenen oder sich in der Stilllegungsphase befindlichen Hausmülldeponien in Baden-Württemberg liegen 85 % im oder am Wald. Die Forstverwaltungen hatten gegen Standorte im Wald meist nur geringe Einwände, wenn gemäß § 11 des baden-württembergischen Landeswaldgesetzes eine befristete Waldumwandlungsgenehmigung erteilt werden konnte. Das heißt, es musste zugesichert und per Planfeststellungsbeschluss festgelegt werden, dass die später abgeschlossene Deponie wieder einer forstlichen Nutzung zugeführt wird. Voraussetzung für eine Aufforstung war bis dahin eine starke Abdeckung mit Boden - aber das war auch schon alles, es wurden von Seiten des Forstes keine weiteren Anforderungen an die Rekultivierungsschicht gestellt. Erst als die nach TASi geforderten Oberflächenabdichtungen ins Spiel kamen, wurden auch die für eine forstwirtschaftliche Nutzung notwendigen Bedingungen erarbeitet.

2 Regelungen

Die Anforderungen an Rekultivierungsschichten im Oberflächenabdichtungssystem von Deponien sind in den folgenden Regelwerken formuliert.

- Technische Anleitung Abfall (TA A) von 1991: Kap. 9.4.1.4 d)
- Technische Anleitung Siedlungsabfall (TASi) von 1993: Kap. 10.4.1.4 d)
- Deponieverordnung (DepV) von 2002: Anhang 5

Die Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) hat durch eine Arbeitsgruppe eine Empfehlung zur Rekultivierung von Deponie erarbeiten lassen. Das 2000 verabschiedete Papier wurde durch Erlasse der Bundesländer eingeführt.

Sehr ausführlich abgehandelt werden Rekultivierungsschichten in den GDA-Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik. Die Empfehlung E2-31 „Rekultivierungsschichten“ befasst sich hauptsächlich mit der Bodenschicht während die Empfehlung E2-32 „Gestaltung des Bewuchses auf Abfalldeponien“ auf die Pflanzendecke eingeht.

In allen Regelungen sind bezüglich der Nutzung von Rekultivierungsschichten keinerlei Angaben hinsichtlich nötiger Anforderungen oder Beschränkungen formuliert. Generell stehen ausschließlich der Schutz der Dichtungs- und Dränelemente sowie die Minimierung des infiltrierenden Niederschlagswassers im Vordergrund, eine mögliche Nutzung wird nicht angesprochen.

3 Langzeitfunktionen der Rekultivierungsschicht

Die Rekultivierungsschicht ist – langfristig betrachtet – das wichtigste Element im Oberflächenabdichtungssystem. Da man davon ausgehen muss, dass im Laufe der Jahrzehnte und Jahrhunderte jedes Dichtungselement irgendwann zumindest teilweise versagen wird, bleibt zum Schluss nur noch die Rekultivierungsschicht mit ihrer Pflanzendecke für die Sickerwasserminimierung wirksam.

Aus den Erfahrungen in der Vergangenheit ist nicht damit zu rechnen, dass Dichtungselemente über sehr lange Zeiträume gewartet und repariert werden.

Wenn dem wirklich so ist, dann stellt sich doch die Frage, ob man nicht von vornherein auf die Dichtungselemente verzichten könnte.

Im Folgenden will ich erklären, warum das nicht sinnvoll ist.

3.1 Die Rekultivierungsschicht als Abdeckung

Die verfüllten ersten Abschnitte zahlreicher Deponien wurden mit zum Teil sehr starken Bodenschichten abgedeckt. Durch gezielte Bepflanzung oder durch natürliche Sukzession hat sich im Laufe der Jahre eine mehr oder weniger geschlossene Pflanzendecke ausgebildet.

Mit Inkrafttreten der TASi ist zu prüfen, ob die Abdeckschichten dieser Abschnitte belassen werden können oder ob Oberflächenabdichtungen nachgerüstet werden müssen. Ausnahmen von der Abdichtungspflicht sind nur dann zulässig, „wenn nachgewiesen wird, dass das anfallende Sickerwasser hinsichtlich Menge und Qualität zu keiner Gewässerbeeinträchtigung führt“.

Bei nicht basisgedichteten Deponieabschnitten ist der geforderte Nachweis schwer zu führen. Da grundsätzlich davon ausgegangen werden muss, dass in Gebieten mit normalen Niederschlagshöhen (um 750 mm/a) ein großer Teil des Niederschlags durch die Abdeck-

schicht hindurch zur Sickerwasserbildung beiträgt, müssen alle wesentlichen Randbedingungen des Einzelfalls erkundet werden. Neben den örtlichen Niederschlagsverhältnissen, der geologischen und hydrogeologischen Situation am Standort (Durchlässigkeit, Grundwasserverhältnisse, seitliche Zuströme etc.), dem noch vorhandenen eluierbaren Schadstoffpotential des Abfalls und anderer wichtiger Informationen, auf die hier nicht eingegangen werden kann, sind Erkenntnisse über die Abdeckschicht (Rekultivierungsschicht) erforderlich. Unter günstigen Bedingungen kann eine Abdeckschicht insgesamt belassen werden, wenn sie nach Maßnahmen wie Tiefenlockerung, Düngung, teilweisem Bodenaustausch oder -verstärkung u.a. für eine optimierte Pflanzendecke vorbereitet werden kann.

Grundsätzlich kann auch eine optimierte Rekultivierungsschicht die Dichtung nicht ersetzen. Große Schichtstärken von 5 und mehr Metern bewirken allenfalls eine Verzögerung des Wasserdurchtritts, sie verhindern ihn nicht. Viel (Boden) hilft nicht immer viel - ab einer Abdeckmächtigkeit von 3 bis 4 Metern kann in der Regel die Evapotranspiration durch weitere Schichtverstärkung nicht mehr gesteigert werden.

Nur an sehr trockenen Standorten mit Niederschlagshöhen < 500 mm/a wird durch die optimierte Rekultivierungsschicht die Jahresmenge an Sickerwasser auf ein u.U. tolerierbares Maß reduziert.

3.2 Die Rekultivierungsschicht im Regeloberflächenabdichtungssystem

3.2.1 Schutzfunktion

Im Regeloberflächenabdichtungssystem hat die Rekultivierungsschicht zunächst die ihr von der TASi zugewiesenen Aufgaben zu erfüllen:

- Schutz der Dichtung
  + vor Wurzeleinwirkung
  + vor Frosteinwirkung
- Standort für Pflanzen
  + als Schutz gegen Wind- und Wassererosion
  + optimierter Bewuchs hinsichtlich der minimierten Wasserinfiltration in das Dränsystem

Als Anforderungen sind in der TASi und DepV lediglich genannt:

- kulturfähiger Boden
- Schichtstärke > 1 m

Durch Einhaltung dieser Anforderungen kann nur der Frostschutz sichergestellt werden. Schutz vor Wurzeln gibt es erst ab einer Schichtstärke von ca. 3 Metern, wenn keine Wurzelsperren vorgesehen sind.

Erste Versuche, Anforderungen an einen „kulturfähigen Boden“ als Basis für einen optimierten Bewuchs - hier Wald - zu stellen, wurde in dem Vorhaben „Forstwirtschaftliche Rekultivierung von Deponien mit TASi – konformer Oberflächenabdichtung“ unternommen. Anregungen und Vorschläge daraus hat die Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) in ihrem Papier „Rekultivierung“ verwendet. Hierin wird u.a. eine Schichtstärke von 1,5 bis 3 Meter vorgeschlagen, es werden Hinweise für den Substrataufbau gegeben und es wird auch dar-

über spekuliert, ob bei einer optimierten Rekultivierungsschicht die Anforderungen an die Dichtungselement geringer sein dürften.

Zu diesem letzten Punkt muss gesagt werden, dass die optimierte Rekultivierungsschicht - heute auch oft als „Wasserhaushaltsschicht“ bezeichnet - dem von der TASi Gewollten voll und ganz entspricht und damit aus meiner Sicht keine Abstriche an den hohen Anforderungen für die Dichtungselemente begründbar sind.

3.2.2 Langzeitbarriere

Die Rekultivierungsschicht als ein Element im Oberflächenabdichtungssystem hat neben den oben genannten Aufgaben von Dichtungsschutz und Pflanzenstandort die wesentlich bedeutendere Aufgabe als „Langzeitbarriere“ zu übernehmen.

Unter Langzeitbarriere verstehe ich die Wirkung der Rekultivierungsschicht als **Wasserhaushaltsschicht** und als **Gasoxidationsschicht**. Mit fortschreitendem Versagen der Dichtungselemente muss die Wirkung der Rekultivierungsschicht als Langzeitbarriere greifen.

Wasserhaushaltsschicht

Da aus heutigen Materialkenntnissen heraus damit zu rechnen ist, dass die Kunststoffdichtungsbahn (KDB) in der Kombinationsabdichtung frühestens nach 100 Jahren allmählich ihre Dichtungsfunktion verlieren wird, hat die Langzeitbarriere genügend Zeit, sich zu entwickeln. Zusammen mit der ohne KDB weniger wirksamen mineralischen Dichtung – der so genannten Langzeitdichtung - und der mineralischen Dränschicht bildet die Rekultivierungsschicht als Wasserhaushaltsschicht dann eine dauerhafte Oberflächenbarriere.

Die Zeit zur Entwicklung der Rekultivierungsschicht hin zur Langzeitbarriere ist notwendig, denn ein ganz wichtiges Element der Langzeitbarriere ist ihr Bewuchs, und der benötigt bis zur volle Entfaltung unter Umständen mehr als ein Jahrhundert.

In der Regel wird die Vegetationsform „Wald“ als optimal für eine maximale Evapotranspiration angesehen und bis sich dieser Wald über alle Stufen – von der ersten Begrünung über den Vorwald bis hin zum Hochwald ausgebildet hat, vergehen viele Jahrzehnte.

Gasoxidationsschicht

Mit dem Versagen der Dichtungselemente lässt nicht nur die Wirkung als Wassersperre nach, es tritt auch Gas durch die lecken Dichtungen nach Außen. Gerade in Bereichen wo Wasser in organischen Abfall eindringt, wird die durch Trockenheit gestoppte Gasproduktion wieder angeregt. Da nicht mehr mit sehr großen Gasmengen gerechnet wird - die Abbauprozesse sind im Laufe der Jahrzehnte größtenteils abgeschlossen worden - muss diese (kleine) Gasmenge in der Rekultivierungsschicht als Gasoxidationsschicht „behandelt“ werden können. Nach heutigem Kenntnisstand können Gasmengen $< 4\ l / h \times m^2$ in Bodenschichten oxidiert werden.

3.3 Die Rekultivierungsschicht im System mit Kapillarsperren

Kapillarsperren sind ein ausgezeichneter Ersatz für bindige mineralische Dichtungen. Ihre Vorteile liegen u.a. in der Austrocknungssicherheit und in der Standfestigkeit bei steilen Böschungen.

Die Nachteile sind systembedingt:

- wegen des nicht bindigen Materials sind sie gasdurchlässig
- bei zu hoher hydraulischer Belastung kommt es zu Wasserdurchbrüchen

Im Zeichen der allgemeinen Sparwut kommen Planer auf den Gedanken, auch bei Hausmülldeponieabdichtungen die geforderte Konvektionssperre wegzulassen und stattdessen eine sogenannte „verstärkte Rekultivierungsschicht“ vorzusehen. Diese „verstärkte Rekultivierungsschicht“ soll den Zufluss zur Kapillarsperre vergleichmäßigen und damit Wasserdurchbrüche verhindern und sie soll als Gasoxidationsschicht wirken.

Abgesehen davon, dass es keine „verstärkte Rekultivierungsschicht“ gibt, die besser als eine TASi–konforme Rekultivierungsschicht wäre - siehe oben - würde in diesem System die geforderte Konvektionssperre fehlen, um als gleichwertig zu gelten. (Mit dem Hinweis auf die „verstärkte Rekultivierungsschicht“ könnte dann ein Planer auch die Konvektionssperre über der mineralischen Abdichtung weglassen wollen).

Die Rekultivierungsschicht als Langzeitbarriere oberhalb einer Kapillarsperre muss sich – wie oben schon für die Regelabdichtung beschrieben – erst allmählich über lange Zeiträume entwickeln. Über diese Zeiträume bis zum vollen Wirksamwerden der Langzeitbarriere muss eine Konvektionssperre (KDB oder Asphaltabdichtung) ober- oder unterhalb der Kapillarsperre die Wasserinfiltration und die Gasemission unterbinden.

3.4 Die Rekultivierungsschicht im System mit kontrollierbaren Dichtungen

In letzter Zeit kamen verschiedene Dichtungskontrollsysteme auf den Markt. Neben Systemen, die die Kontrolle der mineralischen Abdichtungen ermöglichen werden auch mehrere Kontrollsysteme für Konvektionssperren angeboten.

Insbesondere diese Kontrollsysteme für Konvektionssperren - auf der Basis elektrischer Messungen (Potentialmessung, Widerstandsmessung) - sind billig und einfach einsetzbar, ihre Ortungsgenauigkeit für Leckstellen ist sehr hoch.

Da aber kein Deponiebetreiber ohne Zwang zusätzlich zur Regelabdichtung noch ein Kontrollsystem installieren würde, kam man auf den Gedanken, ein Dichtungs-element der Kombinationsabdichtung, die mineralische Dichtung, wegzulassen um damit Kosten zu sparen und insgesamt mit der kontrollierbaren Konvektionssperre unter den Kosten für eine Kombinationsabdichtung zu bleiben. Dann ist jedoch eine Gleichwertigkeit mit dem Regelabdichtungssystem nicht mehr gegeben, dann muss eine Einzelfallentscheidung gemäß §14.6 DepV getroffen werden.

In vielen Fällen kann das durchaus Sinn machen. So zum Beispiel bei Hausmüll-deponien, die nicht aus der Nachsorge entlassen werden können, weil auf Dauer Sickerwasser abgepumpt werden muss (Grubendeponien), oder vertikal-gedichtete Deponien, die einer ”ewigen” Wasserhaltung bedürfen, man sich also um diese Deponien sowieso immer kümmern muss.

Aber auch bei Hausmülldeponien im Waldbereich, auf geeigneten geologischen Formationen mit nur geringem Grundwasserdargebot gelegen, ist es denkbar, ein um die mineralische Dichtung reduziertes kontrollierbares Oberflächenabdichtungssystem zu genehmigen.

Für die Deponie mit einfacher kontrollierbarer Oberflächenabdichtung könnte man sich folgendes Szenario vorstellen:

+ das Oberflächenabdichtungssystem aus Ausgleichsschicht, Gasdränschicht, KDB mit Kontrollsystem, Dränschicht so wie starker (d > 2,50 m) und optimierter Rekultivierungsschicht (von unten nach oben) ist bis zur Entlassung aus der Nachsorge - nach ca. 30 Jahren - absolut funktionstüchtig, Fehlstellen werden - nach Entdeckung durch das Kontrollsystem - sofort repariert.
+ Unmittelbar vor der Entlassung aus der Nachsorge werden nach Aufgrabung und Probeentnahme an mehreren Stellen die Materialeigenschaften der KDB bestimmt. Entsprechen diese dem Neuzustand oder weichen nur geringfügig davon ab - dies ist nach dem heutigen Kenntnisstand über das Alterungsverhalten von Kunststoffdichtungsbahnen zu erwarten - dann steht der Entlassung aus der Nachsorge nichts im Wege. Haben sich die maßgebenden Materialeigenschaften wesentlich verändert (Maßstäbe hierfür sind noch zu erarbeiten bzw. können der BAM–Richtlinie für die Zulassung von KDB entnommen werden), dann muss ein neues Abdichtungssystem aufgebracht werden.
+ Entsprechen die Materialeigenschaften der KDB nach 30 Jahren den Vorgaben, dann ist zu erwarten, dass die KDB noch weitere 50 bis 100 Jahre funktionstüchtig bleibt (die Hauptsetzungen sind abgeklungen und gegenüber anderen mechanischen Belastungen ist sie durch die starke Rekultivierungsschicht geschützt). Über den dann verfügbaren Gesamtzeitraum von 80 bis 130 Jahren bekommt eine Vegetationsschicht die Gelegenheit sich auf dem diesbezüglich optimierten Rekultivierungssubstrat voll zu entfalten und zu einem Hochwald mit Busch- und Krautunterbau heranzuwachsen, der zu einer maximalen Evapotranspiration beiträgt.

Wenn man daran denkt, dass keine wie auch immer geartete Dichtung "ewig" funktioniert, sondern die Rekultivierungsschicht mit Vegetationsschicht eigentlich immer die Langzeitsicherung darstellt, dann erscheint - bei Einhaltung der o.a. Randbedingungen - der Gedanke an eine einfache kontrollierbare Oberflächenabdichtung nicht abwegig.

4 Zusammenfassung

Die Rekultivierungsschicht ist - langfristig gesehen - das wichtigste Element im Oberflächenabdichtungssystem. Sie hat als Langzeitbarriere sowohl die Aufgabe als Wasserhaushaltsschicht als auch die als Gasoxidationsschicht zu versehen.

Die Aufgabe der Rekultivierungsschicht als Langzeitbarriere wurde bisher nicht erkannt oder nicht gewürdigt. Die allgemein gehaltenen Anforderungen der TASi bezüglich Schutzfunktion und Wasserminimierungsaufgabe nahm man zwar zur Kenntnis, aber man zog keinerlei Konsequenzen daraus: es wurden in der Praxis bisher kaum Anforderungen an den Aufbau der Substratschicht und ihrer optimierten Bepflanzung gestellt.

Das muss sich ändern. Handreichungen dafür, wie die Rekultivierungsschicht als Langzeitbarriere aufgebaut werden kann, gibt es inzwischen mehrere.

Bezüglich der Wirksamkeit der Rekultivierungsschicht als Gasoxidationsschicht laufen zurzeit noch Untersuchungen, die aber in der nächsten Zeit abgeschlossen sein werden. Dann sind sicher auch Anforderungen an die Langzeitbarriere als Gasoxidationsschicht formulierbar. Erfahrungen mit Gasmessungen an der Oberfläche von Rekultivierungsschichten haben schon in der Vergangenheit gezeigt, dass selbst unspezifisch aufgebaute Rekultivierungsschichten ein hohes Methanoxidationspotential besitzen.

Die Rekultivierungsschicht als Langzeitbarriere benötigt sehr viel Zeit für ihre Entwicklung, denn ihr wichtigstes Element hinsichtlich der Wasserminimierungsaufgabe ist ihre Pflanzendecke - und die leistungsfähigste Pflanzendecke in dieser Hinsicht ist der Wald. Und der Wald braucht Zeit sich zu entwickeln.

Bis sich die Langzeitbarriere ausgebildet hat, müssen die Dichtungsschichten noch voll funktionstüchtig sein, deshalb können keine Abstriche an der Qualität der Dichtungselemente zugelassen werden. Auch dann nicht, wenn eine sogenannte “verstärkte Rekultivierungsschicht“ vorgesehen ist. Denn jede Rekultivierungsschicht, die die Mindestvorgaben der TASi übertrifft, entspricht der TASi und ist nicht „besser“.

5 Literatur

Brauns, J. et al : Rekultivierung für forstliche Nutzung bei Deponien mit Regeldichtungen, Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltministeriums Baden-Württemberg, Dezember 1996, Kurzfassung, zu beziehen über: LfU Baden-Württemberg, Karlsruhe

Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg: Forstwirtschaftliche Rekultivierung von Deponien mit TA Siedlungsabfall - konformer Oberflächendichtung, Handbuch Abfall, Band 13, Herausgeber: LfU Baden-Württemberg, Karlsruhe, 1997

Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA): „Rekultivierung“, Papier eingeführt durch Erlasse der Bundesländer, z. B. mit Erlass des Landes Baden-Württemberg an die Regierungspräsidien vom 12.05.2000

Deutsche Gesellschaft für Geotechnik: E 2-31 – Rekultivierungsschichten Veröffentlichung als GDA – Empfehlung in der Bautechnik 9/2000

Deutsche Gesellschaft für Geotechnik: E 2-32 – Gestaltung des Bewuchses auf Abfalldeponien, Veröffentlichung als GDA – Empfehlung in der Bautechnik 9/2000

Die Versuchsanlage „Leonberger Lysimeterfelder“

aus: WATTENDORF et al. (2005)

Zum besseren Verständnis der nachfolgenden Beiträge über die Rekultivierungsschichten der Leonberger Lysimeterfelder wird hier vorab die Versuchsanlage Leonberg vorgestellt.

1 Aufbau der Testfelder

Die Anlage zur Untersuchung der Rekultivierungsschichten auf der Deponie Leonberg besteht aus vier Testfeldern (Tabelle 1 und Abbildung 1). Sie liegt auf einer Höhe von 510 bis 520 m ü NN. Die Versuchsanlage ist in eine Böschung des Deponieabschnittes A VI der seit 1999 stillgelegten Kreismülldeponie Leonberg integriert. Die Versuchsfelder sind nach Südosten exponiert. Die mittlere Böschungsneigung beträgt circa 1: 2,7.

Tabelle 1: Versuchsfelder zur Gestaltung von Rekultivierungsschichten

Feld	Fläche	Rekultivierungsschicht
U	360 m²	**U**nverdichtet, d.h. ohne zusätzliche Verdichtung eingebaut
K	360 m²	nach **k**onventionellem Verfahren dreilagig verdichtet
D	180 m²	unverdichtet, Feld für umfangreichere **d**estruktive Versuche
B	180 m²	unverdichtet mit ingenieurbiologischem Verbau (**B**uschlagen)

Wichtigster Bestandteil der Anlage sind die beiden **Großlysimeterfelder** mit jeweils ca. 360 m² Fläche, in die im Herbst 2000 die Versuchsvarianten

- „unverdichtet eingebaute Rekultivierungsschicht“ (Feld **U**) und
- „konventionell verdichtete Rekultivierungsschicht“ (Feld **K**), eingebaut wurden.

Die Felder (Abbildung 1) sind analog zur TASI/DEPVO aufgebaut, die Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht orientiert sich an gängigen Empfehlungen.

1. Am Fuß der beiden Lysimeterfelder dient ein mit dem Untergrund verzahnter bindiger Randwall als Begrenzung zur Umgebung und als Auflager. An beiden Seiten sind die Lysimeterfelder von jeweils circa 1 m hohen Trenndämmen aus mineralischem Dichtungsmaterial (Proctordichte ≥ 95 %), begrenzt.

2. Über diesen Aufbau wurde eine PE-HD-Kunststoffdichtungsbahn (d = 2,5 mm) verlegt und verschweißt, die seitlich und unterhalb auf die Trenndämme hoch gezogen wurde, so dass zwei dichte Wannen entstanden. Die Kunststoffdichtung reicht jedoch auch auf den Trenndämmen nicht bis zur Bodenoberfläche. So sollen Randumläufigkeiten, z.B. durch den Eintritt von Regenwasser in Spalten zwischen Kunststoffdichtung und Boden vermieden werden.

3. Ein Schutzvlies mit einem Flächengewicht von 1.200 g/m² auf der Kunststoffdichtungsbahn in den Lysimeterfeldern soll Beschädigungen verhindern. Darauf folgt eine 30 cm mächtige Entwässerungsschicht aus durchlässigem Schottermaterial (Korngröße 0/56), auf dem die beiden Rekultivierungsschichten direkt aufliegen.

4. Die verdichtete Rekultivierungsschicht im K-Feld wurde mit einer Mächtigkeit von durchschnittlich 2,1 m, die unverdichtete im U-Feld mit 20 cm Überhöhung zum Feld K eingebaut, um Setzungen des lockeren Materials auszugleichen.

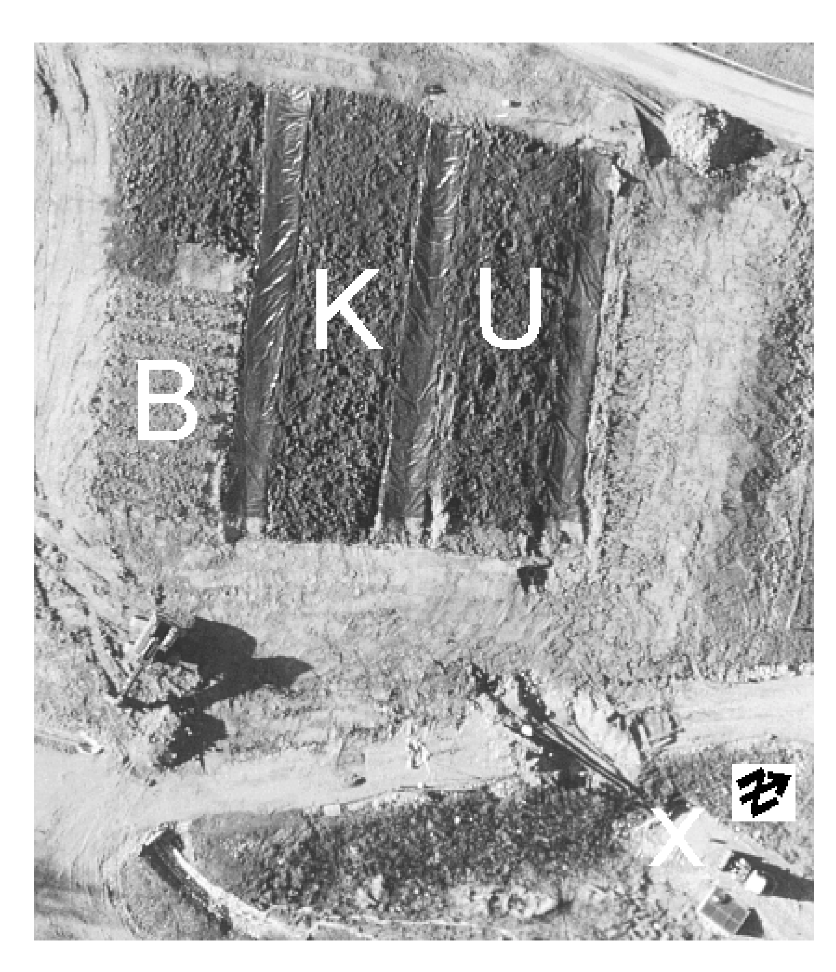


Abbildung 1:
Testfelder in Leonberg nach dem Abschluss der Bodenarbeiten im Dezember 2000

B = Buschlagen-Feld
K = konventionell verdichtet
U = unverdichtet
x = Messhütte

Die Lysimeterfelder werden durch 3 m breite KDB-Streifen auf der Bodenoberfläche voneinander und von der Umgebung abgegrenzt (siehe Abbildung 1), um lateralen Wasserzutritt zu vermeiden. Hierzu wurde eine UV-stabilisierte Folie aus PE-HD mit einer Stärke von 0,75 mm verwendet. Diese Streifen leiten durch eine muldenförmige Profilierung des Untergrundes Niederschlagswasser ab.

Bodeneigenschaften der Rekultivierungsschichten

Die Rekultivierungsschichten der Lysimeterfelder U und K unterscheiden sich lediglich durch die Bodeneinbauverfahren (Abbildung 3), Boden, Oberbodenbearbeitung und Bepflanzung sind identisch. Das Bodenmaterial der Rekultivierungsschicht aller Felder stammt aus einer Entnahmestelle im Süden von Stuttgart. Während der Erdbauarbeiten wurden die Bodeneigenschaften laufend überwacht, um eine gleich bleibende Qualität des Bodenmaterials sicherzustellen. Der sehr homogene Lösslehm der Bodenarten schwach und mittel toniger Schluff (Ut2 und Ut3 nach AG BODEN 1994) ist bei Gehalten an organischer Substanz von 0,5 % fast humusfrei und auch praktisch steinfrei. Die Trockenraumdichte des Bodens im Entnahmezustand war relativ hoch und lag zwischen 1,44 und 1,77 g/cm³, im Mittel bei 1,57 g/cm³.

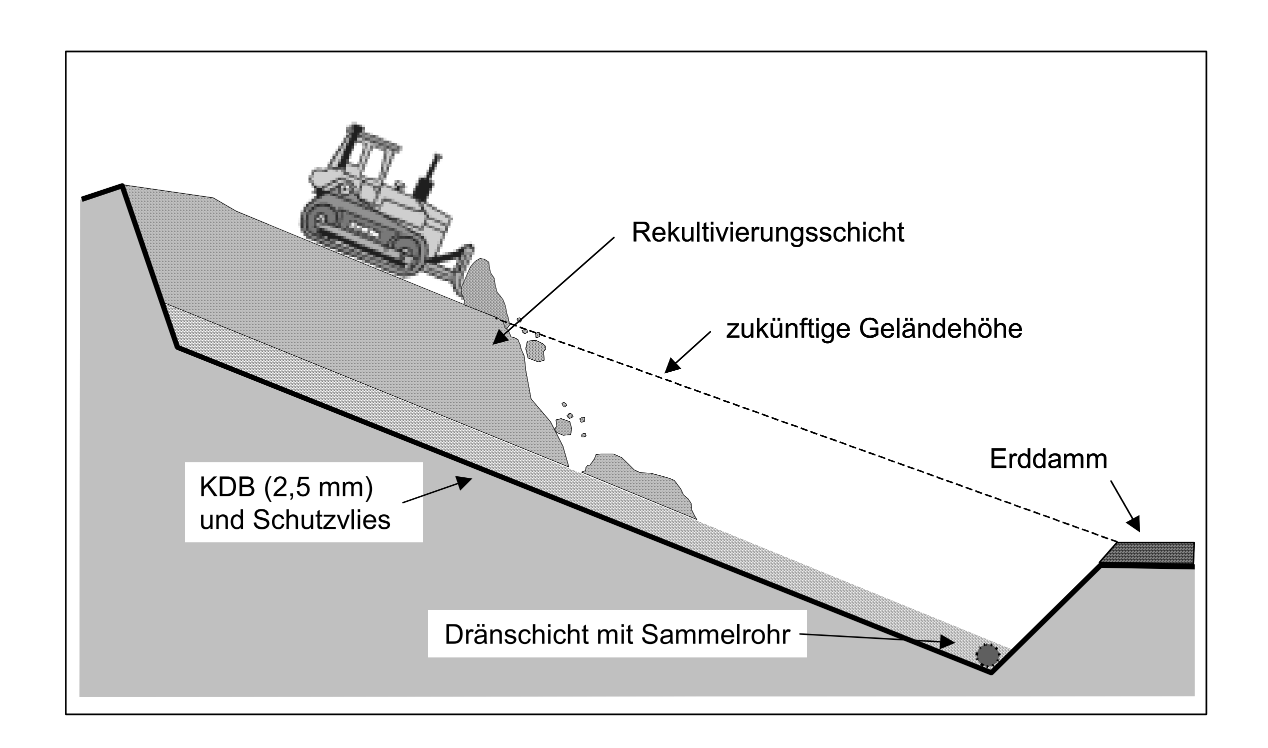


Abbildung 2: Längsschnitt durch ein Lysimeterfeld am Beispiel des U-Feldes während der Herstellung der unverdichteten Rekultivierungsschicht



Abbildung 3: Einbau der Rekultivierungsschicht in die Lysimeterfelder im November 2000; links: Verdichtung mit der Stachelwalze im K-Feld, rechts: Vor-Kopf-Einschieben mit leichter Raupe im U-Feld

Nach Einbau des Mineralbodens wurde außer in Feld B eine 2 cm dünne Kompostschicht (circa 10 kg/m²) ohne Einarbeiten von Hand auf die Bodenoberfläche aufgebracht, um den Anteil organischer Substanz zu erhöhen. Bezogen auf eine Oberbodenschicht von 10 cm

Mächtigkeit ergeben sich so Humusgehalte um 4 %. Dieses Verfahren steht im Gegensatz zu dem in der Rekultivierungspraxis üblichen Auftrag von humosem Oberboden. Mit ihm wurde ein zusätzliches Befahren der Bodenoberfläche vermieden. Weiterhin sollte es verhindern, dass sich die Durchwurzelung auf den humosen Oberboden konzentriert.

Die Rekultivierungssubstrate enthalten kein oder nur sehr wenig Carbonat (Stufen „carbonatfrei“ bis „carbonatarm“ nach AG BODEN 1994). Sie sind „sehr schwach sauer“ bis „sehr schwach basisch“ und weisen pH-Werte (in $CaCl_2$) zwischen 5,6 und 6,7 auf. In Wasser wurden Werte zwischen 6,6 und 7,4 gemessen.



Abbildung 4: Die Leonberger Versuchsfelder im Juli 2005, von links: Buschlagenfeld, Lysimeterfeld K, Lysimeterfeld U

Die Leonberger Versuchsfelder wurden mit Ausnahme des Buschlagenfeldes (Feld B) sofort nach Abschluss der Erdbauarbeiten im Dezember 2000 mit 1,0 – 1,5 m hohen Heistern der Zitterpappel (*Populus tremula*) bepflanzt. Nach der Gehölzpflanzung wurde Winterweizen (*Triticum aestivum*) als Erosionsschutz eingesät. Aufgrund der Jahreszeit kam keine andere schnellwüchsige Kultur in Frage. Im März 2001 wurde eine konventionelle Gräser- und Kräuter-Saatmischung ausgebracht. Im November 2001 wurden Linden (*Tilia platyphyllos*), Schwarzerlen (*Alnus glutinosa*) und Apfelbäume (*Malus sylvestris*) nachgepflanzt, um die Bestandesentwicklung zu beschleunigen und abgestorbene Zitterpappeln zu ersetzen. Weitere, durch Wühlmäuse und Beschädigungen bedingte Ausfälle unter den Gehölzen wurden im März 2004 durch Spitzahorn (*Acer platanoides*) und Bergahorn (*Acer pseudoplatanus*) ersetzt.

2 Instrumentierung der Leonberger Lysimeterfelder

Außer der Messeinrichtung für die Abflüsse wurden die Lysimeterfelder entsprechend der Aufgabenstellung der Forschungsvorhaben mit weiteren Messeinrichtungen bestückt (Tabelle 2 und Abbildung 5).

Tabelle 2: Instrumentierung der beiden Großlysimeterfelder U und K auf der Deponie Leonberg: Anzahl der Messstellen pro Feld, Position in der Böschung sowie Tiefenstufen der einzelnen Messfühler

Messgröße Methode		Lage	Tiefenstufe [cm] 25	50	85	135
In beiden Lysimeterfeldern (**U** - unverdichtet / **K** - konventionell verdichtet):						
➢ **Bodenwassergehalt** TDR-Punktmessung	4		■	◆	○	▼
TDR-Messkabel (10 m)	1		■		○	▼
➢ **Wasserspannung** Einstich-Tensiometer	2		■	◆	○	▼
➢ **Bodentemperatur** Thermometer	2		■	◆	○	▼
➢ **Bodenluft: CO_2-Gehalt** Gaslysimeter	2		■	◆	○	▼
➢ **Stauwaser** Piezorohre	1			◆	○	▼
Nur in Testfeld **U**:						
➢ **Schereigenschaften** In-Situ-Schertester	2			◆		▼
➢ **Bodenmechanik** Bewegungs-/Setzungspegel	6		Bodenoberfläche			

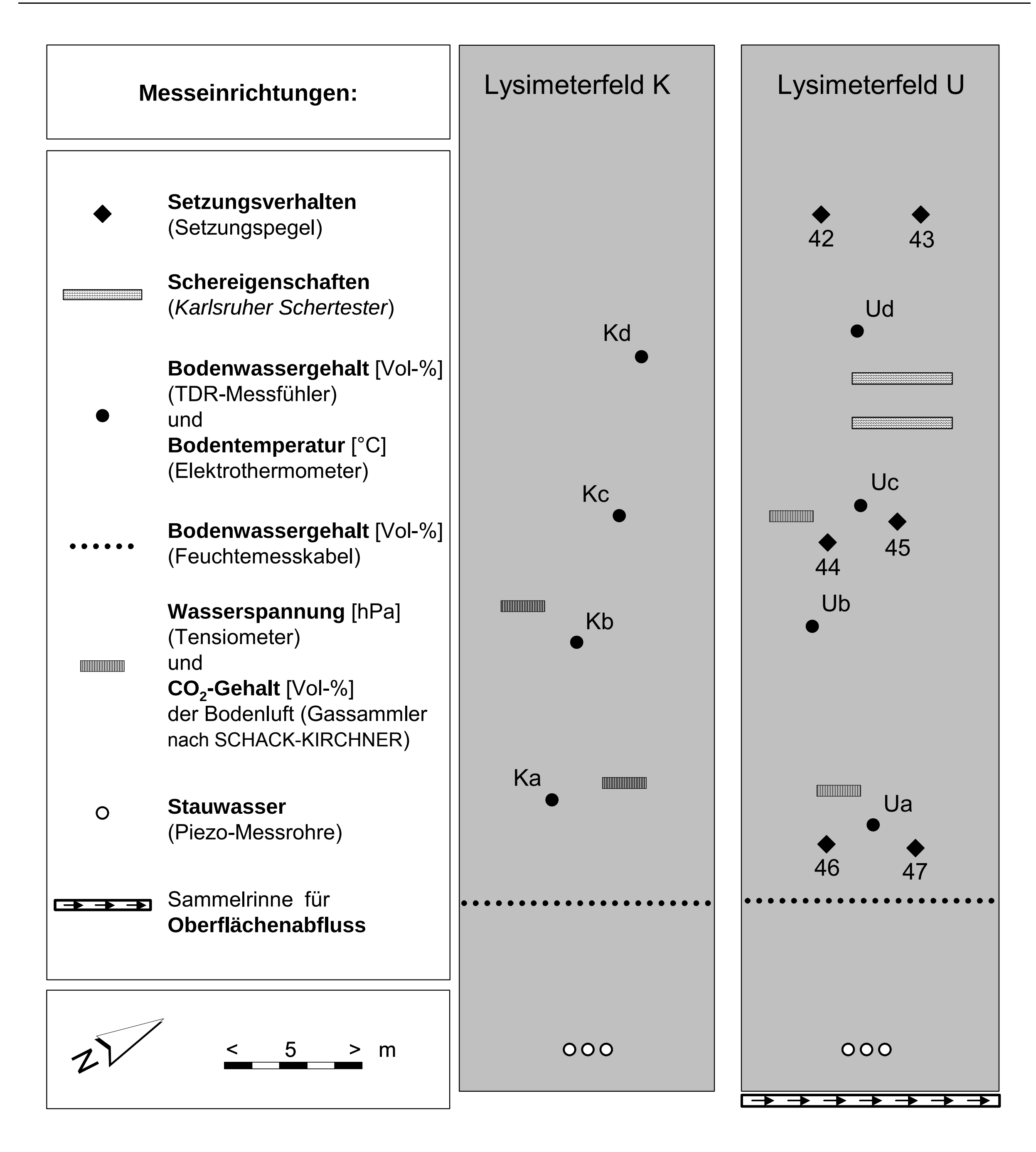


Abbildung 5: Anordnung der Messinstrumente und Bezeichnung der Messpunkte in den Großlysimeterfeldern auf der Kreismülldeponie Leonberg

2.1 Oberflächenabfluss und Absickerung

Das Sickerwasser (Dränabfluss) aus den Rekultivierungsschichten der Lysimeterfelder fließt in der Entwässerungsschicht auf der KDB hangabwärts und wird am unteren Rand der Felder gesammelt. Der Oberflächenabfluss wird am Fuß des Lysimeterfeldes U[1] in einer Rinne mit 15 cm Durchmesser gefasst. Das Wasser aus den Lysimeterfeldern wird in Rohrleitungen zur Messstation unterhalb der Versuchsanlage geleitet.

---

[1] Aus Kostengründen wird nur der Oberflächenabfluss des U-Feldes gemessen. Da die Bodenoberfläche beider Versuchsfelder gleich gestaltet ist, sind gleiche Oberflächenabflussraten zu erwarten.

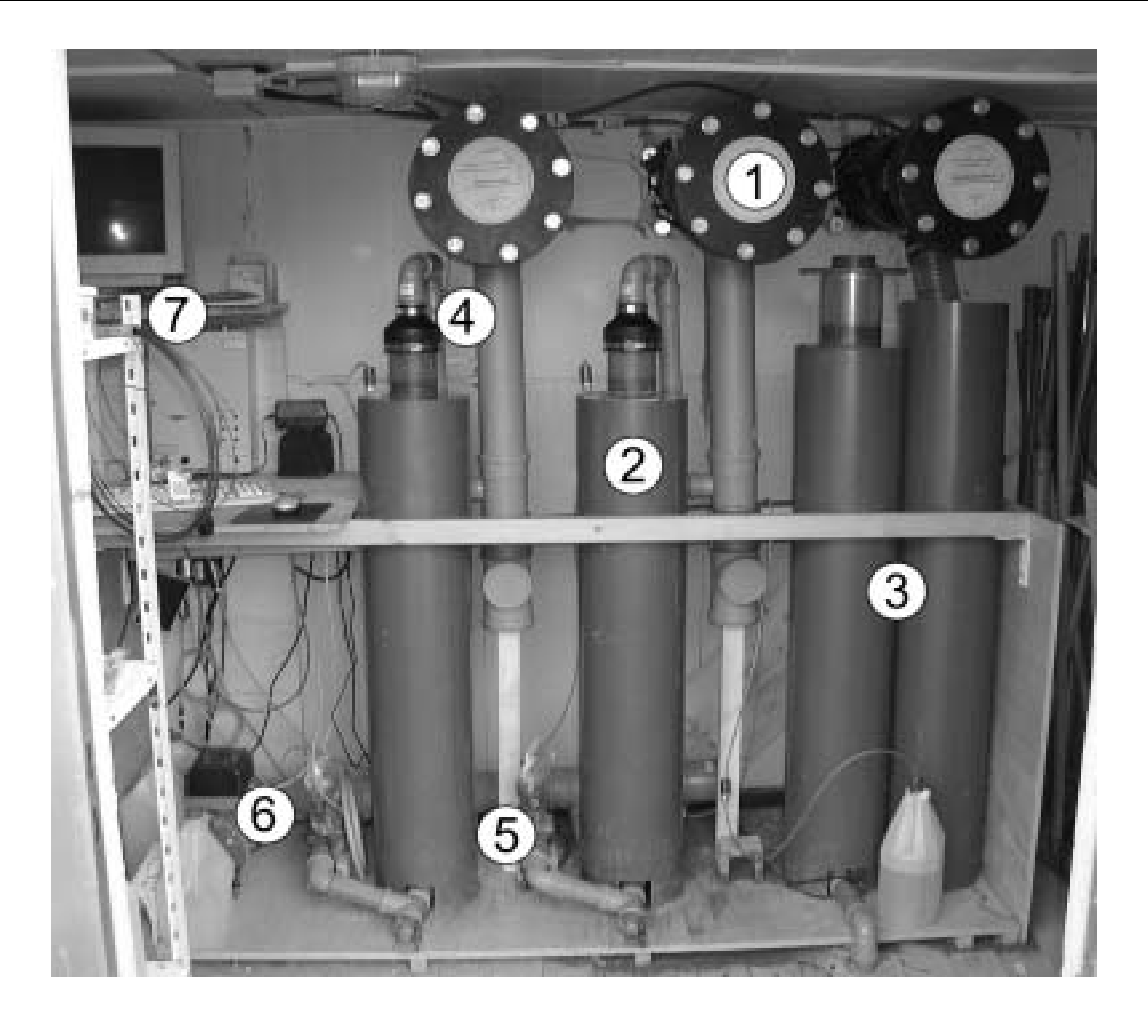


Abbildung 6: Anlage zur Messung der Abflüsse aus den Lysimeterfeldern; zu sehen sind:
(1) die drei Rohrleitungen aus den Testfeldern,
(2) die beiden Messbehälter für den Dränabfluss mit ihrem Filtersystem (4),
(3) der Doppel-Messbehälter für den Oberflächenabfluss des U-Feldes,
(5) die Magnetventile zum Entleeren der Behälter
(6) der induktive Durchflussmesser (IDM) und
(7) die Schaltanlage mit PC zum Ansteuern und Auslesen der Datenlogger

Die Geräte erlauben eine kontinuierliche Erfassung der Abflüsse aus den Lysimeterfeldern K und U mit variabler hoher zeitlicher Auflösung. Die Messeinrichtung arbeitet nach folgendem Prinzip (siehe Abbildung 6):

- In der Messhütte sind zwei Messbehälter mit je 45 l Inhalt für die Dränabflüsse (Absickerung) aus dem U- und K-Feld sowie ein Doppelbehälter für den Oberflächenabfluss aus dem U-Feld mit ca. 90 l Fassungsvermögen aufgestellt.
- Die Abflüsse aus den Lysimeterfeldern werden durch beheizbare Rohrleitungen in die Messbehälter eingeleitet.
- In jedem Behälter hängt eine Drucksonde, die die Höhe der über ihr stehenden Wassersäule auf 1 cm (= 0,46 l) genau ermittelt. Die Wasserstände werden - außer bei sehr hohen Absickerungsmengen - in Intervallen von 10 Minuten aufgezeichnet.

- Bei Erreichen eines oberen Grenzwertes wird ein Magnetventil am Behälterboden geöffnet und der Behälter schlagartig entleert, bis ein unterer Grenzwert ereicht ist. Das Magnetventil schließt sich und der Messzyklus beginnt von neuem.
- Aus den regelmäßig in frei wählbaren Zeitintervallen gespeicherten Wasserständen in den Messbehältern können die Abflussraten aus den Feldern berechnet werden.

Ein induktiver Durchflussmesser (IDM) am gemeinsamen Abflussrohr aller Messbehälter erfasst nochmals die Gesamtabflüsse, so dass auch beim Versagen einzelner Sonden exakte Messungen möglich sind.

2.2 Bodenwasserhaushalt

Bodenwassergehalt

Der Bodenwassergehalt in den Versuchsfeldern wird an je vier Messstellen pro Lysimeterfeld (siehe Tabelle 2) mit der TDR-Methode (*Time Domain Reflectrometry*) mit einem Messgerätesystem TRASE Model 6050X1 gemessen. Laut Herstellerangaben beträgt die Messgenauigkeit ± 2 Vol-%.

Bodenwasserspannung (Matrixspannung)

Zusätzlich zu den TDR-Messfühlern wurden in den Lysimeterfeldern an den Messstellen Ua/Ka und Uc/Kc (siehe Tabelle 2 und Abbildung 5) konventionelle Einstichtensiometer in den gleichen Bodentiefenstufen installiert. Der Messbereich der Tensiometer reicht maximal bis ca. 850 hPa Wasserspannung. Es können also nur Werte in nassem, feuchtem und frischem Boden gemessen werden, bei trocknem Boden wird der Messbereich überschritten. Bildet sich im Boden eine Stauwasserschicht aus, so kann der Druck dieser Wassersäule im Tensiometer auch negative Drücke (hPa-Werte < 0) hervorrufen.

Stauwasser

Zur weiteren Überprüfung der Stauwasserbildung wurden am Unterhang der Lysimeterfelder jeweils drei Piezorohre mit einem Durchmesser von 2,5 cm bis in 50, 85 und 135 cm Tiefe installiert. In diesen Piezorohren stellt sich dann, wie in einem Brunnen, gegebenenfalls ein Wasserspiegel des freien Bodenwassers ein, der mit dem atmosphärischen Luftdruck im Gleichgewicht steht. Seit Oktober 2005 wird in einem der Piezorohre der Wasserstand kontinuierlich aufgezeichnet.

Bodentemperatur

Die Bodentemperaturen werden an den gleichen Messstellen wie die Bodenwasserspannung in der gleichen Tiefenabstufung gemessen. Hierzu wurden in jedem Lysimeterfeld die Messpunkte a und c mit Thermosensoren in 25, 50, 85 und 135 cm Tiefe ausgestattet.

Bodenluft

Auch der CO_2-Gehalt der Bodenluft wird in den vier Tiefenstufen 25, 50, 85 und 135 cm an je zwei Messpunkten (a und c) in jedem Lysimeterfeld gemessen.

2.3 Scherparameter und Setzungsverhalten

Da Untersuchungen zum Scherverhalten unverdichteter Substrate bisher nur im Labor vorgenommen werden konnten, war es unerlässlich, in der ersten großtechnischen Umsetzung zu prüfen, inwieweit die Ergebnisse der Laborversuche auf die realen Bedingungen in der Natur tatsächlich übertragbar sind. Aus diesem Grunde wurden am Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik eigens entwickelte und konstruierte Einrichtungen zur Ermittlung der Scherparameter - „Karlsruher Schertester“ - in Testfeld U eingebaut. „Karlsruher Schertester“ bestehen aus Stangen mit einer Anzahl von Scheiben, die mit einem Drahtseil durch den Boden gezogen werden und dabei eine zylindrische Scherfuge erzeugen (siehe Beitrag BIEBERSTEIN & REITH in diesem Band).

Das Widerlager für das Durchziehen und Abscheren entlang einer ± zylindrischen Scherfläche bildet ein verloren eingebetteter Stahlkasten, in dem die Zugseile um 90° in die Vertikale umgelenkt und durch Schutzrohre zur Geländeoberfläche geführt werden. Zum Messzeitpunkt wird der in situ-Scherversuch unter Zuhilfenahme von Einrichtungen, wie sie auch für Ankerprüfungen verwendet werden, durchgeführt.

Unverdichtet eingebaute Böden sind stärkeren Setzungen und Verformungen unterworfen als verdichtete Böden. Um das Ausmaß und den zeitlichen Verlauf dieser Entwicklung zu dokumentieren, wurden im U-Feld sechs Messpunkte (Vermarkungen), je zwei in drei Höhenlagen (siehe Abbildung 5), zur Dokumentation von Bodenbewegungen installiert. Als Referenzpunkte, um die Setzungen des gesamten Deponiekörpers zu erfassen, wurden im Mai 2003 auch auf den Wegen ober- und unterhalb der Testfelder Vermarkungen angebracht.

Bodenmechanisches Verhalten und Standsicherheit unverdichteter Rekultivierungssubstrate

A. Bieberstein, H. Reith, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Karlsruhe

Inhalt

3 Einführung und Problemstellung

Beim derzeitigen Entwicklungsstand im Abfallsektor bzw. im Deponiewesen in Deutschland stehen u. a. Fragen zur Langzeitwirksamkeit von Oberflächenabdichtungssystemen im Vordergrund. Eine optimierte Rekultivierungsschicht mit entsprechendem Bewuchs kann hierbei einen wesentlichen Beitrag leisten.

Ein entscheidender Faktor für eine dauerhafte Wirkung der Rekultivierungsschicht ist ein fortwährender, gut wasserzehrender Bewuchs, der einen möglichst hohen Anteil des Niederschlags an die Atmosphäre zurückgibt und damit die Sickerwasserbildung langfristig reduziert. Neben einem weitreichenden Speichervermögen erfordert dies eine möglichst optimale Durchwurzelbarkeit des als Rekultivierungsschicht aufzubringenden Substrates. Dies setzt neben einer ausreichenden Mächtigkeit eine möglichst geringe (Lagerungs-)Dichte des betreffenden Bodens voraus. Dieser pflanzenökologischen Forderung nach geringer Verdichtung steht gewöhnlich die Bedingung ausreichender Verdichtung zur Gewährleistung der Standsicherheit entgegen.

In einem Gemeinschaftsprojekt verschiedener Institutionen ist anhand eines Testfeldsystems mit unterschiedlich hergestellten Teilfeldern vergleichend dem Verhalten von (reichlich 2 m) mächtigen Rekultivierungsdecken nachgegangen worden. Die Untersuchungen betrafen neben den mechanischen Aspekten die Fragen des Wasserhaushaltes und der Bewuchsentwicklung.

Im vorliegenden Beitrag werden die bodenmechanischen Fragestellungen insbesondere bei unverdichtetem Einbau des Rekultivierungssubtrates behandelt, speziell das Sackungs- und Scherverhalten des hier verwendeten, in den Testfeldern auf der Kreismülldeponie Leonberg (Landkreis Böblingen) eingebauten Lößlehms.

4 Bodenmechanische Untersuchungen an Rekultivierungssubstrat in locker geschüttetem Zustand

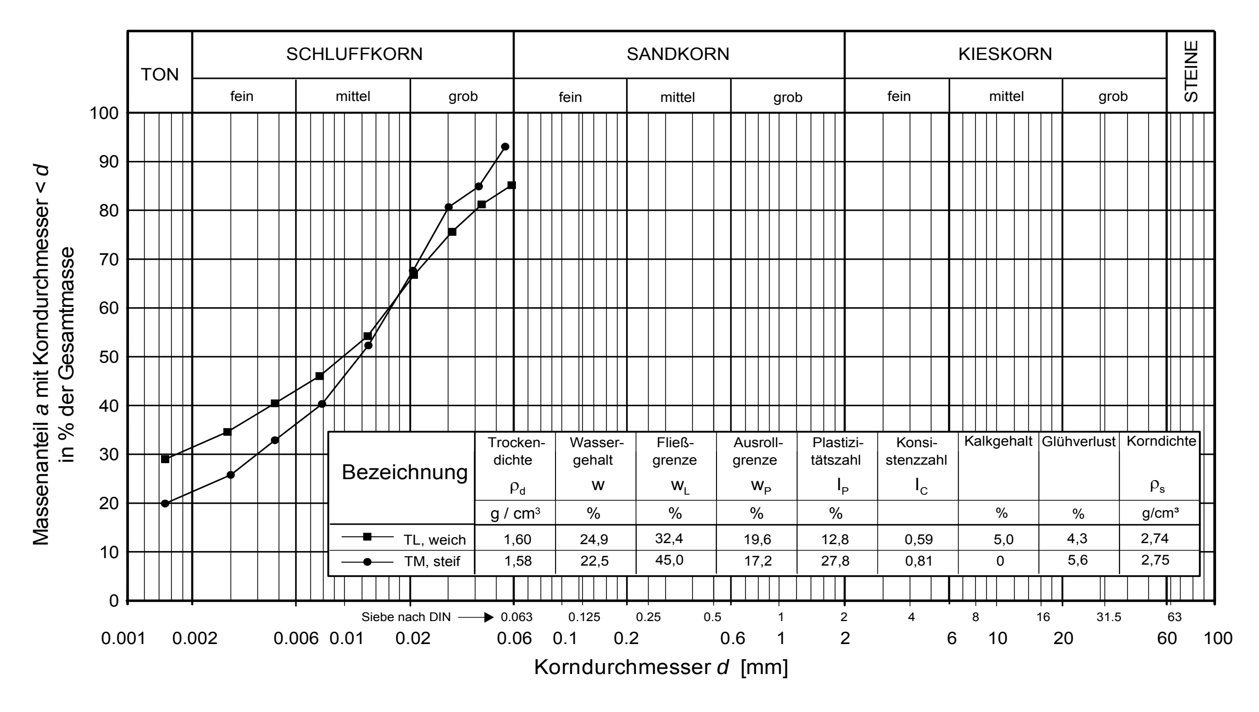
Im Rahmen der Untersuchungen an regional verfügbarem Lößlehm am Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe (TH) standen folgende Problempunkte im Vordergrund, wobei sowohl pflanzenökologische als auch geotechnische Gesichtspunkte berücksichtigt werden mussten:

- Ermittlung der erzielbaren Trockendichten bei lockerem Substrateinbau sowie Klärung der Dichteentwicklung unter statischer Belastung bzw. bei Wasserinfiltration; Prognose der zu erwartenden Setzungen zur Ermittlung der erforderlichen Auftragshöhe beim Materialeinbau,
- Untersuchung des Scherverhaltens des locker geschütteten Substrates mit geeigneten Versuchstechniken im Labor,
- Nachweis der Standsicherheit für maßgebende Scherfugen der Testfelder in Leonberg,
- Überprüfung des Sackungsverhaltens der Rekultivierungsschicht im Feld,
- Entwicklung, Bau und Einsatz einer Messtechnik zur Überprüfung der aktuellen Scherfestigkeit in situ.

Aus dem umfangreichen Untersuchungsprogramm werden hier ausgewählte Ergebnisse exemplarisch angeführt.

4.1 Laboruntersuchungen

Bild 1 gibt einige kennzeichnende Größen des Materials wieder, aus dem die klumpigen Aggregate des Schüttstoffes aufgebaut waren.



Bezeichnung	Trockendichte ρ_d	Wassergehalt w	Fließgrenze w_L	Ausrollgrenze w_P	Plastizitätszahl I_P	Konsistenzzahl I_C	Kalkgehalt	Glühverlust	Korndichte ρ_s
	g / cm³	%	%	%	%		%	%	g/cm³
TL, weich	1,60	24,9	32,4	19,6	12,8	0,59	5,0	4,3	2,74
TM, steif	1,58	22,5	45,0	17,2	27,8	0,81	0	5,6	2,75

Bild 1: Kenngrößen des Erdstoffes für die Rekultivierungsschicht

Das Schüttmaterial, dessen Aggregate (Größe bei max. 32 mm) im Ausgangszustand eine Trockendichte um ρ_d = 1,6 g/cm^3 (entspricht ca. 0,9 x $\rho_{Proctor}$) und einen Wassergehalt im Bereich w = 23 bis 25 % (deutlich über $w_{Proctor} \approx$ 17 %) aufweisen, wurde in möglichst lockerer Schüttung sowohl in einem Großödometer (51 cm Durchmesser) als auch in einem großmaßstäblichen Rahmenschergerät (Probengröße b x l x d = 1,2 m x 1,2 m x 0,4 m) auf das Setzungsverhalten unter Last, das Sackungsverhalten unter Befeuchtung und das Scherverhalten unter geringen Auflasten untersucht. Vergleichsweise durchgeführte Standard-Rahmenscherversuche an zur Fließgrenze aufbereitetem Material haben einen Winkel der Gesamtscherfestigkeit von $\phi_s' \approx 30°$ ergeben. Die Untersuchungsergebnisse bildeten die Grundlage der Vorgaben für den Einbau im Feld und für die Bewertung der Verformungen und der Standsicherheit in situ.

A) Haufwerksdichte, Setzungs- und Sackungsverhalten

Die Raumdichte (trocken) des lockeren Aggregathaufwerkes wurde in den verschiedenen Versuchen zu 1,0 ≤ ρ_d ≤ 1,15 g/cm^3 bestimmt (Größenordnung der Porosität bei n = 60 %). Das Haufwerk wies demgemäß reichlich Makroporen auf, die für den Lufthaushalt und die Durchwurzelbarkeit besonders wichtig sind.

Stellvertretend wird das Verhalten des locker geschütteten Substrates unter einer Belastung von σ = 35 kN/m² und anschließender Bewässerung anhand des Ergebnisses eines Ödometerversuches beschrieben (Bild 2).

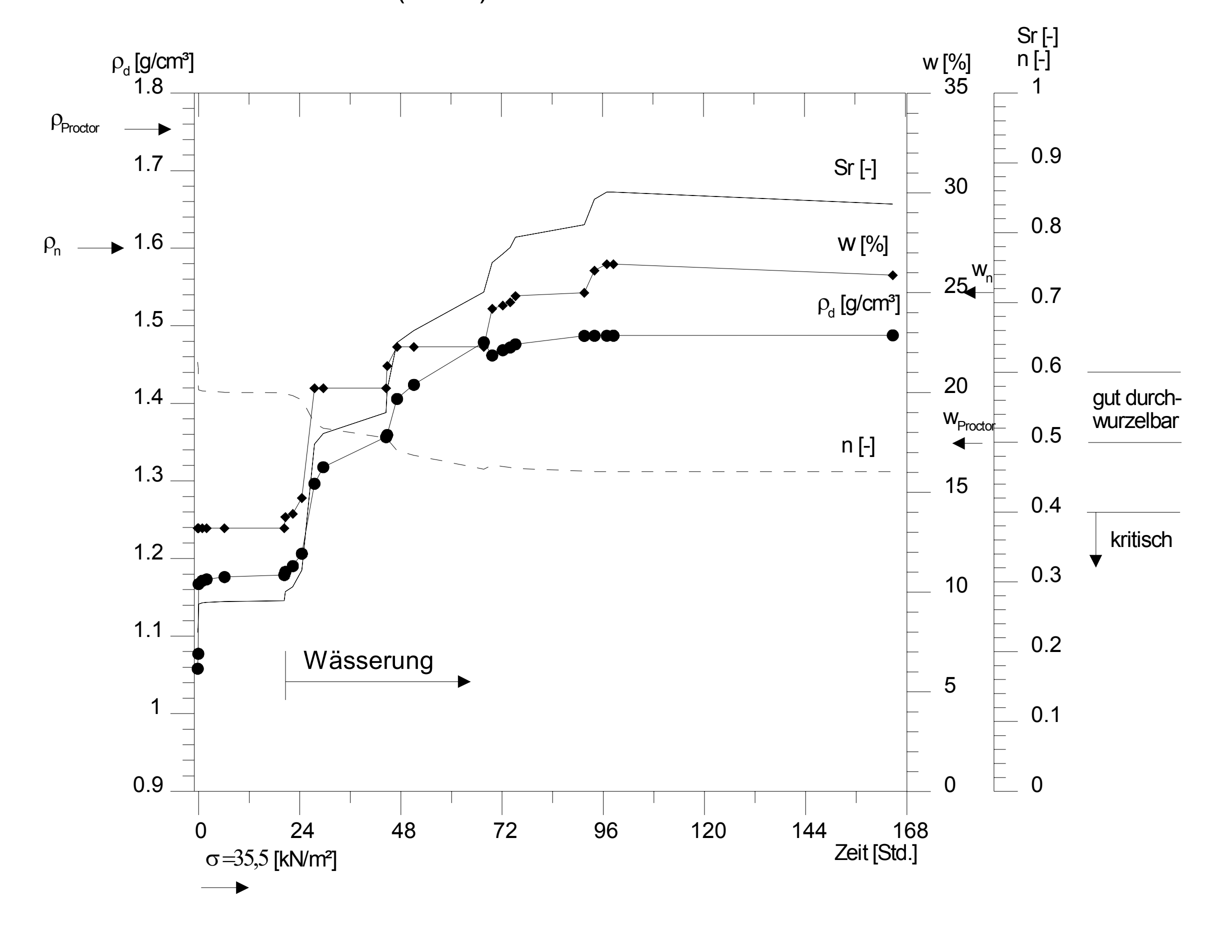


Bild 2: Locker eingebautes Reku-Substrat - Zeitlicher Verlauf der Trockendichte, der Gesamtporosität, des Wassergehaltes und des Sättigungsgrades während eines Belastungsversuches mit anschließender Bewässerung

Wie an den aufgetragenen Werten zu Versuchsbeginn zu erkennen ist, lag

- die Ausgangstrockendichte bei ρ_d = 1,05 g/cm^3 (entsprechend n ≈ 60 %), der Ausgangswassergehalt bei etwa w = 13 % (während der Lagerung des Materials bis zum Einbau hat der Wassergehalt somit von ursprünglich 23 bis 25 % durch Verdunstung messbar abgenommen) und
- der relative Sättigungsgrad bei S_r = 26 %.

Unter den relativ geringen Belastungen, die in Anlehnung an die kleinen Auflastspannungen in der 2 bis 3 m dicken Substratschicht im Feld mit σ_{max} = 35 kN/m^2 gewählt wurden, nahm die Trockendichte nur in Grenzen zu, nämlich allein unter Last bis gegen ρ_d = 1,18 g/cm^3 (n ≈ 56 %).

Nach Abklingen der Lastsetzungen wurden die Proben bewässert, um das Sackungsverhalten unter Niederschlagsinfiltration zu untersuchen. Die Bewässerung erfolgte chargenweise, bis das kapillare Haltevermögen überschritten war und Wasser unten aus der Probe austrat.

Die dabei eingetretenen Veränderungen der Parameter sind aus Bild 2 ablesbar: Der Wassergehalt stieg stufenweise an und näherte sich 26 % (zufällig etwa dem natürlichen Wassergehalt gleich), entsprechend stieg die relative Sättigung gegen 85 %, während die Befeuchtung eine Sackung der Probe bewirkte, so dass rd weiter auf etwa 1,48 g/cm^3 (entsprechend einer Abnahme von n auf ca. 45 %) stieg, was ca. dem 0,85-fachen Wert der Proctordichte entspricht. Gleichwohl sank die Gesamtporosität – wie rechts neben dem Diagramm in Bild 2 angeschrieben – nur unwesentlich unterhalb des Bereiches von 0,5 bis 0,6, der als noch gut durchwurzelbar gilt.

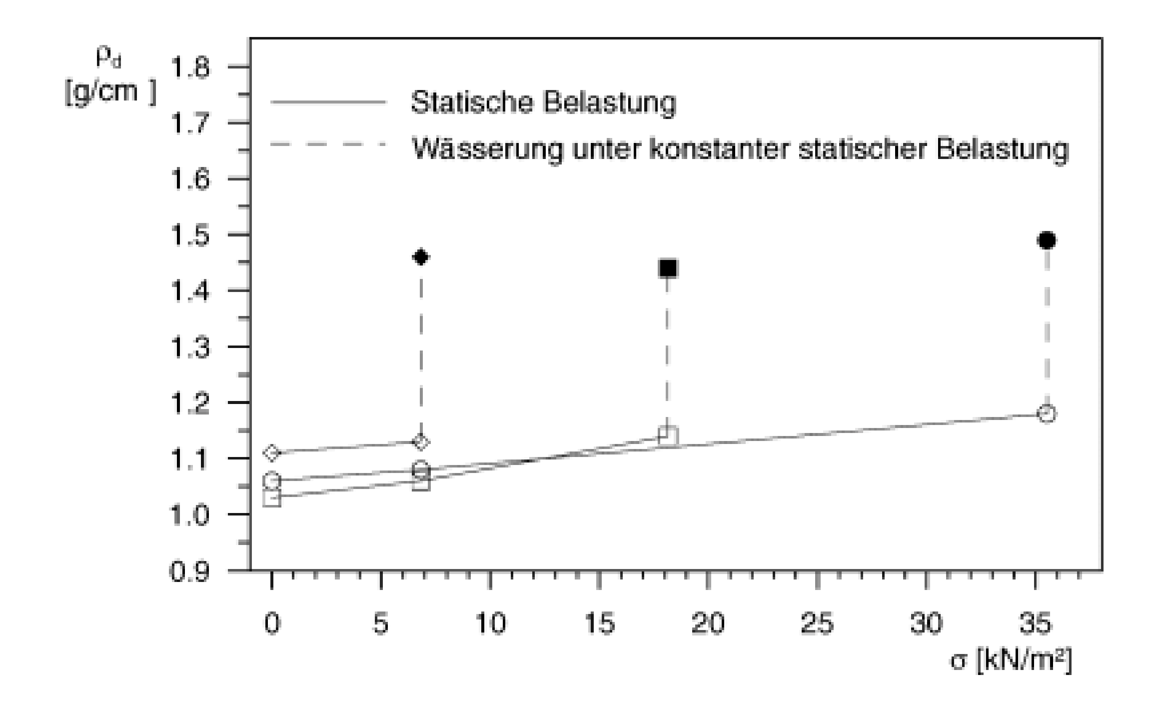


Bild 3: Resultierende Trockendichten in Abhängigkeit der Auflast und des Bewässerungszustandes

Ein vergleichbares Verhalten wie im beschriebenen Versuch zeigte sich auch bei weiteren Ödometerversuchen mit anderen Auflastspannungen und entsprechenden Versuchen im Großscherkasten.

Insgesamt ergab sich, dass der Hauptanteil der Verformungen im Zusammenhang mit der Wasserzugabe erfolgt, und die sich dann einstellenden Dichten nur unwesentlich von den hier gewählten Spannungen abhängen (vgl. Bild 3).

Es kann festgehalten werden, dass als Rekultivierungsschichten locker geschüttete Substrate aus (schwach-)bindigem Material eine für die Pflanzenbesiedelung (Durchwurzelung) vorteilhafte hohe Porosität unter Belastungen, wie sie bei Schütthöhen bis 3 m auftreten, behalten. Dies gilt auch unter den Einwirkungen von Wasserinfiltrationen. Das Verhalten unter Langzeitbedingungen im Feld war hiervon unabhängig zu untersuchen

B) Scherverhalten

Das Scherverhalten von Erdstoffen der vorliegenden Art wird gewöhnlich in wohldefinierten Verdichtungszuständen und unter gesättigten Versuchsbedingungen, z. B. im Rahmenscherversuch mit „Wasserbad“, untersucht. Das Ergebnis einer Serie von kleinmaßstäblichen Rahmenscherversuchen (Scherfläche 6 cm x 6 cm) an breiig aufbereitetem und anschließend konsolidiertem Material ist im Diagramm von Bild 4 dargestellt.

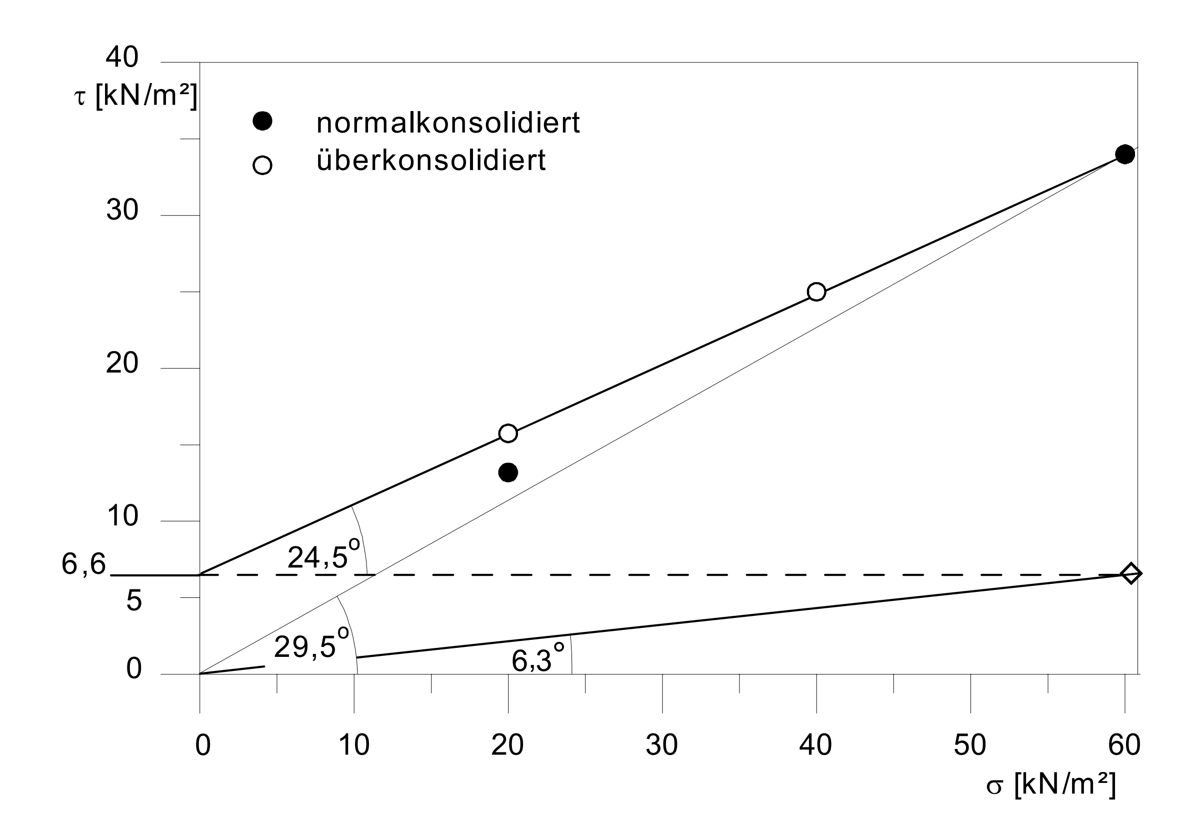


Bild 4: Ergebnis von üblichen Rahmenscherversuchen an aufbereiteten Substratproben (Scherfläche: 6 cm x 6 cm)

Nach üblicher Interpretation ergibt sich
- der Winkel der Gesamtscherfestigkeit $\phi'_s \approx 30°$
- der Winkel der inneren Reibung $\phi' \approx 25°$
- der Winkel der (vorlastabhängigen) Kohäsion $\phi'_c \approx 6°$

Für den Zustand des Substrates im Zustand loser Schüttung als Rekultivierungsschicht stellt sich die Frage nach der in situ verfügbaren Scherfestigkeit unter „natürlichen“ Bedingungen. In einem großmaßstäblichen Rahmenschergerät ist versucht worden, die locker geschütteten Verhältnisse im Labor nachzustellen.



1: unterer, unverschieblicher Rahmen
2: oberer, verschieblicher Rahmen
3: Stahlplattengewichte (Auflast)
4: Antriebseinheit
5: Steuerungs- und Datenerfassungseinheit

Bild 5: Ansicht der Versuchsanlage für großmaßstäbliche Rahmenscherversuche



Bild 6: Blick in den Scherkasten des Rahmenschergerätes mit dem zusätzlich eingelegten Gitterrahmen zur flächigen Schubkrafteinleitung in die obere Probenhälfte (Probe noch nicht fertig eingebaut)

Ohne Verdichtung wurde das Material in das große Rahmenschergerät eingebaut (vgl. Bild 5 und Bild 6).

Insgesamt wurden drei betreffende Probenkörper untersucht (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Versuchsbedingungen der großmaßstäblichen Rahmenscherversuche

Versuchskörper	Versuchstyp	Feuchte w [%]	Auflast σ [kN/m²]
1	Mehrstufenversuch	19 19	6,9 17,5
2	Einzelversuch	~ 25*	17,5
3	Einzelversuch	~ 25 *	37,0
*durch Bewässerung			

Erwartungsgemäß wird der Scherwiderstand des mit Makroporen durchsetzten Materials erst über größere Scherwege geweckt (vgl. Bild 7). So ist insbesondere die erste Stufe des Zweistufenversuchs an nicht bewässertem Material (Versuchskörper 1, vgl. Tabelle 1) bei weitem nicht zum Grenzzustand gefahren worden. Das aus dem natürlichen Feuchtezustand auf $w \approx 19$ % abgetrocknete und so eingebaute Material zeigte unter Auflegen der Auflast die im unteren Diagramm aufgetragenen Setzungen, die sich beim Abscheren nur geringfügig vergrößerten.

Die gewässerten Versuchskörper 2 und 3 zeigten erwartungsgemäß bei Lastaufbringung beträchtlich größere Setzungen. Der verfügbare Scherwiderstand war beim Abscheren auch nach jeweils 160 mm Scherweg noch nicht ausgeschöpft.

Die jeweils zu Versuchsende erzielten Scherwiderstände sind gleichwohl im τ-σ-Diagramm des Bildes 8 aufgetragen und den Linien aus Bild 4 gegenübergestellt.

Die Werte aus dem Zweistufenversuch an Versuchskörper 1 zu einer Scherkennlinie zu verbinden wäre angesichts der Arbeitslinien (Bild 7) wenig angebracht. Für die Ergebnisse der Einzelversuche (Versuchskörper 2 und 3), die beide bis s = 160 mm gefahren wurden, ist dies jedoch gerechtfertigt.

Im Endergebnis ist insgesamt bedeutsam, dass die gemessenen Scherwiderstände – obwohl noch nicht bis zum Größtwert ausgeschöpft – sämtlich oberhalb der durch Φ_s' gekennzeichneten Linie liegen. Offensichtlich liefert die Festigkeit der Aggregate selbst im bewässerten Zustand einen ausreichenden Beitrag, dass das mit Makroporen noch durchsetzte, insgesamt naturgemäß nur teilgesättigte Substratgefüge „en gros“ einen höheren Scherwiderstand als der Boden im (wassergesättigt) normal-konsolidierten Zustand zu entwickeln vermag. Ein Anteil an saugspannungsinduzierter „scheinbarer Kohäsion“ ist naturgemäß eingeschlossen.

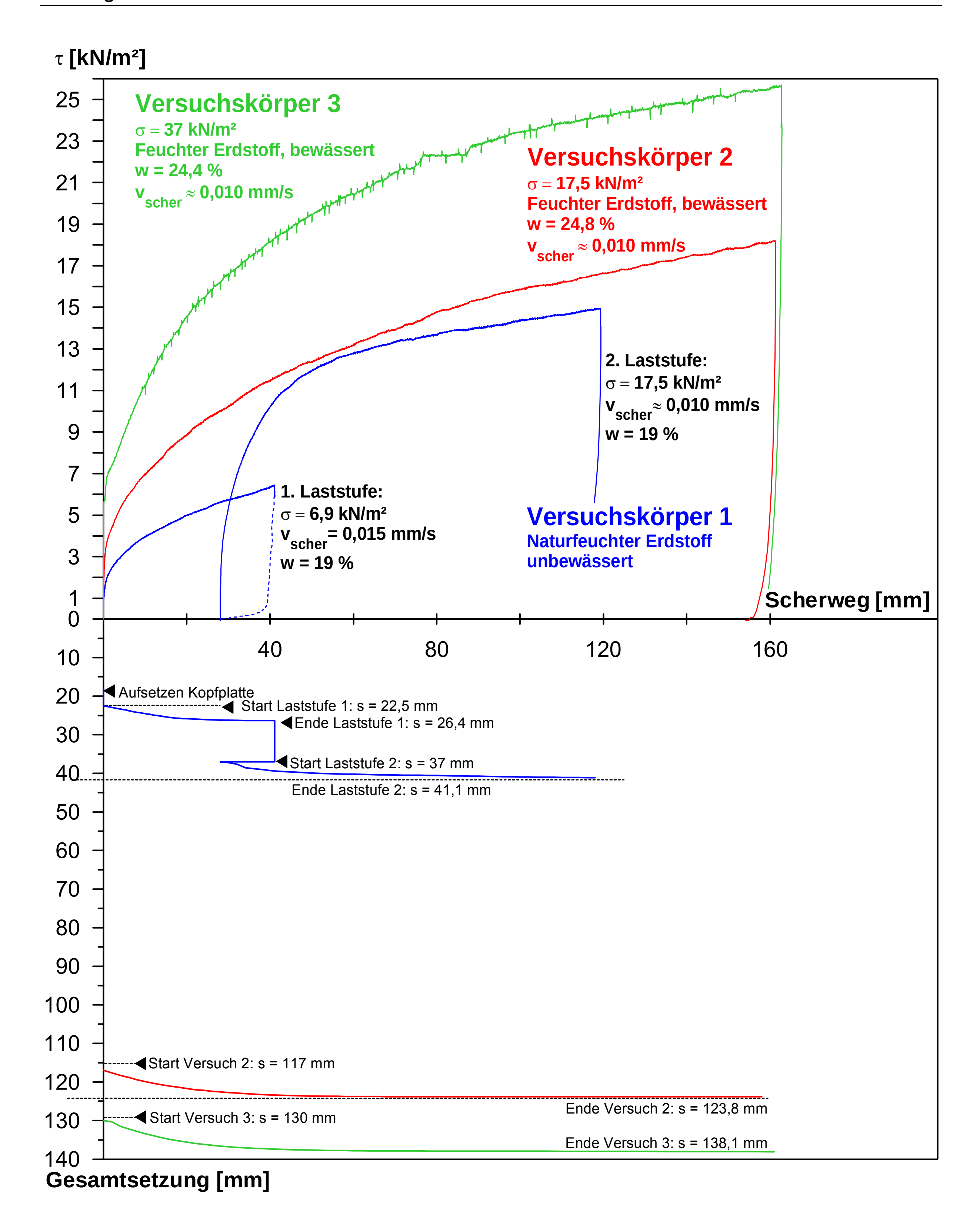


Bild 7: Arbeitslinien und Setzungsverhalten beim Abscheren im großen Schergerät

Vor diesem Hintergrund ist der Schluss erlaubt, dass man auf der Basis von klassischen Rahmenscherversuchen an gestört eingebautem Material bei der Wahl von Böschungsneigungen anhand ϕ_s' auch für locker geschüttete Substrate nicht auf der unsicheren Seite liegt. Dies gilt jedenfalls für das im vorliegenden Beispiel untersuchte Material und solange

wie mit dem Eintreten durchgängig gesättigter Bodenverhältnisse nicht gerechnet werden muss.

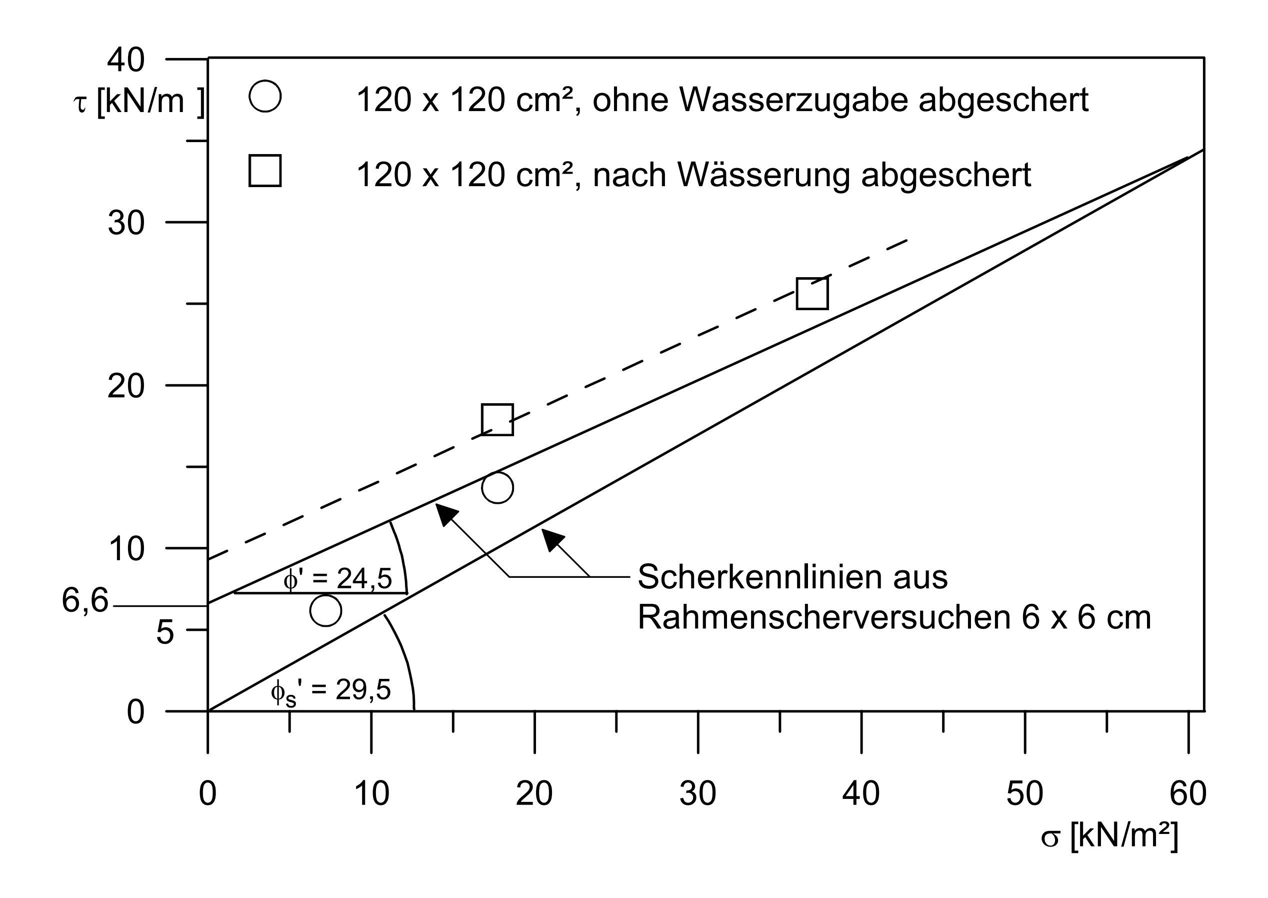


Bild 8: Ergebnisse der Großscherversuche im Vergleich mit denjenigen nach Bild 4

Auf der Grundlage dieser Untersuchungen konnten die erdstatischen Nachweise für die Testfelder auf der Deponie Leonberg für alle zu betrachtenden Scherfugen und Lastfälle erbracht werden.

Angesichts dieser im Labor erhaltenen Ergebnisse stellte sich aus der Sicht der Übertragung in die Natur die Frage, wie sich die Feuchtebedingungen, die Dichteentwicklung sowie die Scherfestigkeitsentwicklung dort längerfristig konkret darstellt. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Messeinrichtungen in den Testfeldern installiert, die nachfolgend vorgestellt werden.

4.2 Versuchseinrichtungen für Felduntersuchungen

A) Sackungs- und Verschiebungsverhalten

Zur Beurteilung des Setzungs- und Verformungsverhaltens des locker geschütteten Reku-Substrats wurden in der Oberfläche insgesamt sechs Vermarkungen – jeweils zwei in drei Höhenlagen der unter 1 : 2,7 geneigten Testfeldoberfläche - eingebaut (vgl. Lageplan in Bild 9). Diese wurden im Zeitraum von Februar 2001 bis Dezember 2003 insgesamt fünfzehn Mal geodätisch eingemessen. Dies erfolgte zunächst etwa in zweimonatigem Turnus, das letzte Zeitintervall betrug 7 Monate. In Bild 9 sind im mittleren Bereich ein Höhenschnitt mit der

Lage der Vermarkungen und die Oberfläche des Testfeldes zu Beginn der Messungen sowie zum Zeitpunkt der letzten Messung (Dezember 2003) eingetragen. Die Verformungen, die sich im Zeitraum zwischen der Fertigstellung des Testfeldes (Dezember 2000) und der ersten Messung bereits eingestellt hatten, können lediglich grob abgeschätzt werden und wären noch hinzuzurechnen.

In oberen Teil von Bild 9 sind die gemessenen Verformungsverläufe im Detail dargestellt. Da die Falllinie der Böschung im Grundriss nur wenig (ca. 8°) von der West-Richtung abweicht, entsprechen die Rechtswerte im vorliegenden Fall weitgehend der horizontalen Komponente der hangabwärts gerichteten Verschiebungen.

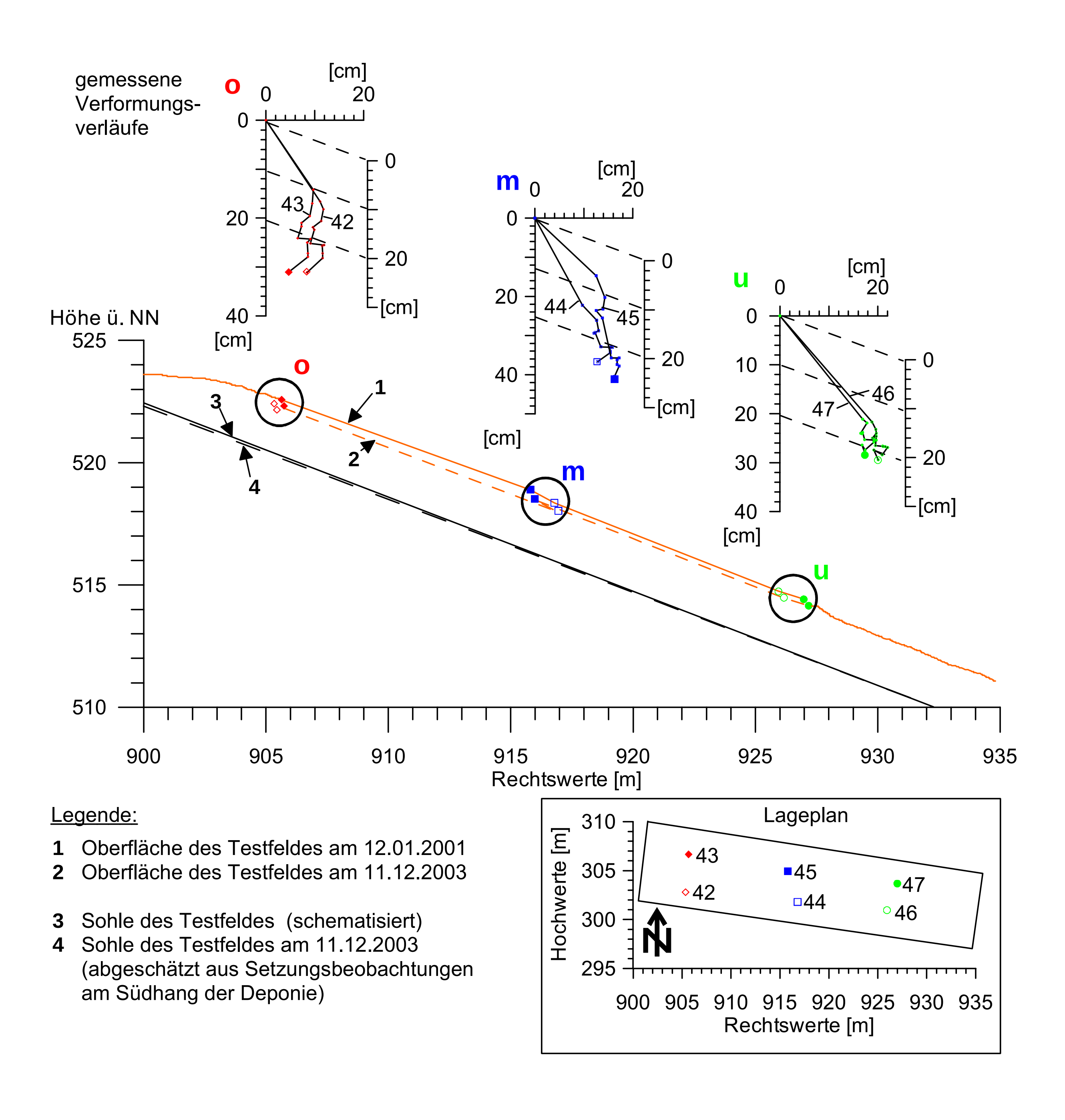


Bild 9: Ergebnisse zum Sackungs- und Verformungsverhalten aus den Beobachtungen der Vermarkungen

Wie ersichtlich, fand ein Großteil der Verformungen bereits innerhalb des ersten Messintervalls statt. Die Horizontalverschiebungen sind tendenziell unten am größten. Nach dem ersten Messintervall traten keine wesentlichen Horizontalverformungen mehr ein. Für den zeitweise beobachteten geringfügigen Rückgang der Horizontalverformungen – insbesondere bei den beiden oberen Vermarkungen (Nr. 42 und 43) - gibt es bislang noch keine schlüssige Erklärung. Zum einen mögen hier Messtoleranzen eine gewisse Rolle spielen, zum anderen könnte die Ursache im Verformungsverhalten des Deponiekörpers selbst liegen.

Die gemessenen hangparallelen Verformungen (Hochwerte) sind erwartungsgemäß gering. Sie betragen maximal ca. 4 cm und sind hier nicht dargestellt.

Um nun von den gemessenen Verformungen der Testfeldoberfläche auf die Verformungen bzw. Setzungen der Reku-Schicht schließen zu können, sind die Verformungen des Deponiekörpers mit einzubeziehen. Geodätische Messungen im Rahmen der Bauwerksüberwachung zeigen im gleichen Zeitraum auf der oben an das Testfeld heranreichenden Fläche der Deponie Vertikalverformungen zwischen 12 cm und 20 cm. Für den oberen Bereich des Testfeldes kann daher anhand der Daten von einer Vertikalverformung des Deponiekörpers von etwa 12 cm bis 17 cm ausgegangen werden.

Weiterhin ist aus den Vermessungen des Deponiekörpers bekannt, dass die Vertikalverformungen entlang der Böschung von unten nach oben in etwa linear ansteigen. Die Verformungen am Böschungsfuß sind nahezu Null, da sich hier die Böschung mit dem ursprünglichen Gelände verschneidet.

Dieser Sachverhalt ist durch die mit 3 und 4 gekennzeichneten Linien des Diagramms im mittleren Teil von Bild 9 dargestellt. Weiterhin wird hier angenommen, dass die Verformungen des Deponiekörpers - die sich bekanntermaßen über sehr lange Zeiträume erstrecken - während des hier betrachteten Zeitraums kontinuierlich eintraten. Unter diesen Voraussetzungen wurden die betreffenden vertikalen Verformungsanteile, die aus den Verformungen des Deponiekörpers stammen, ermittelt und von den gemessenen Verformungen der Testfeldoberfläche abgezogen. Diese korrigierten Daten sind in den Diagrammen von Bild 10 aufgetragen. Der Vertikalanteil, der sich aus den Horizontalverschiebungen eines Punktes an der Böschungsoberfläche ergibt und nicht der Setzung der Reku-Schicht zuzuschreiben ist, wird in den Diagrammen durch die - entsprechend der Böschung - geneigten Linien berücksichtigt.

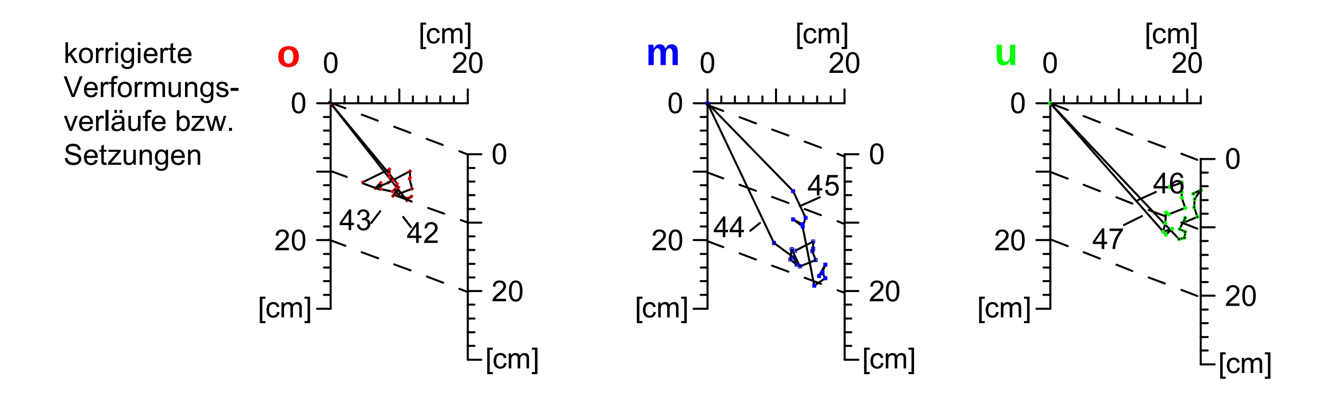


Bild 10: Korrigierte Verformungsverläufe des Testfeldes bzw. Setzungen der Reku-Schicht

Die ermittelten Setzungen der Reku-Schicht betragen somit zwischen ca. 12 cm (oben) und ca. 20 cm (Mitte). Die geringeren Setzungen im oberen Bereich resultieren aus der verfahrensbedingten größeren Einbaudichte. Die dargestellten Verläufe zeigen noch deutlicher, dass die Verformungen im Wesentlichen innerhalb des ersten Messintervalls eingetreten sind. Eine Ausnahme bilden hier allerdings die beiden mittleren Vermarkungen.

Unter der Annahme, dass im Zeitraum zwischen der Fertigstellung der Testfelder und der ersten Messung bereits 50 % der Verformungen eingetreten sind, ergeben sich für die Reku-Schicht Setzungen in der Größenordnung von 10 bis 15 % der Einbauhöhe.

Für die Baupraxis ergibt sich daraus, dass locker geschüttete Reku-Schichten mit einer angestrebten Endmächtigkeit von 2 m mit einem Überprofil im Dezimeterbereich herzustellen sind.

B) Schertester

Zur Überprüfung der tatsächlichen Scherparameter in situ sind an verschiedenen Stellen und in unterschiedlicher Tiefenlage sogenannte „Karlsruher Schertester“ eingebaut worden, die am Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik entwickelt und gebaut wurden. Dabei handelt es sich um Stahlstangen mit einer Anzahl von Scheiben, die mit einem Drahtseil durch den Boden gezogen werden und dabei eine etwa zylinderförmige Scherfuge erzeugen (Bild 11).

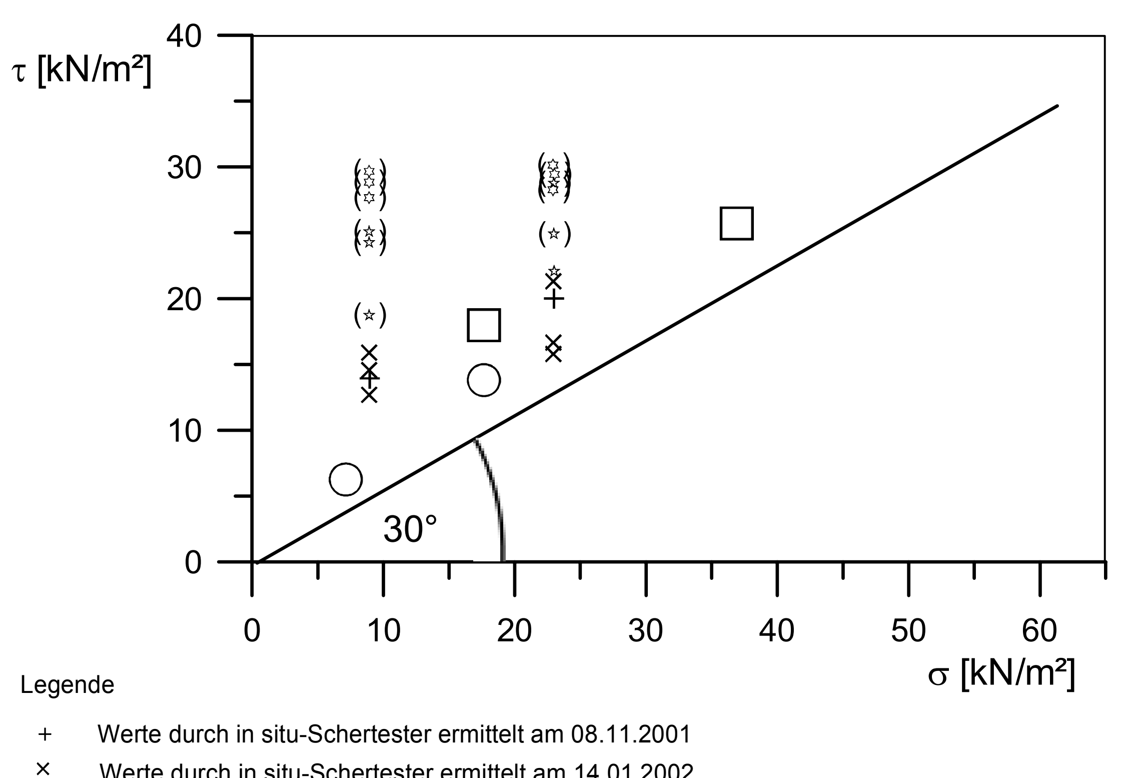


Bild 11: Karlsruher Schertester während des Einbaus in der Rekultivierungsschicht

Das Widerlager für das Durchziehen und Abscheren entlang einer ± zylindrischen Scherfläche bildet ein verloren eingebetteter Stahlkasten, in dem die Zugseile um 90° in die Vertikale umgelenkt und durch Schutzrohre zur Geländeoberfläche geführt werden (Bild 11). Zum

Messzeitpunkt, der nach Belieben in Abhängigkeit des Alters der Schüttung und auch der Feuchteverhältnisse gewählt werden kann, wird der in situ-Scherversuch unter Zuhilfenahme von Einrichtungen, wie sie auch für Ankerzugprüfungen verwendet werden, durchgeführt.

Die ermittelten Scherspannungen sind in Abhängigkeit vom Überlagerungsdruck in Bild 12 dargestellt. Wie ersichtlich, lagen die Werte der anfänglichen Messungen (Messungen in 2001 und 2002) im gleichen Bereich wie die durch großmaßstäbliche Rahmenscherversuche ermittelten Scherspannungswerte. D. h. das Scherverhalten in situ bestätigte zunächst die aus den Laborversuchen abgeleiteten Erkenntnisse. Weitere Messungen in 2003 zeigten jedoch im Ergebnis unrealistisch hohe Scherspannungen. Nach genauer Untersuchung durch Aufgrabung und Inspektion wurde festgestellt, dass Setzungen und Verformungen des Testfeldes Zwängungen in die Schertester eingetragen hatten, so dass sich systembedingt deutlich höhere Werte ergaben.



Legende

+ Werte durch in situ-Schertester ermittelt am 08.11.2001

× Werte durch in situ-Schertester ermittelt am 14.01.2002

(⋆) Werte durch in situ-Schertester ermittelt am 22.01.2003

(✡) Werte durch in situ-Schertester ermittelt am 17.02.2003

○ Scherfläche 120 x 120 cm², ohne Wasserzugabe abgeschert (ρ_d ~ 1,1 g/cm³)

□ Scherfläche 120 x 120 cm², nach Wässerung abgeschert (ρ_d ~ 1,2 g/cm³)

∡ Scherkennlinie aus normalkonsolidierten Versuchen (A = 6 cm x 6 cm)

} Laborversuche

Bild 12: Vergleichende Darstellung der Ergebnisse aus Scherversuchen im Labor und aus Versuchen mit in situ-Schertestern im Testfeld

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag werden Untersuchungen zum Verhalten locker geschütteter Rekultivierungssubstrate am Beispiel des Substrats der Testfelder der Deponie Leonberg beschrie-

ben. Es werden Ergebnisse von Versuchen über die Dichte und ihre Entwicklung bei Befeuchtung und über das Scherverhalten mitgeteilt.

Weitere Untersuchungen betreffen das Verhalten im Feld, dem teils mit speziell entwickelten Versuchseinrichtungen nachgegangen wurde. Aufbau und Installation dieser Geräte wurden kurz vorgestellt und Ergebnisse mitgeteilt.

Die Untersuchungsergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Für locker geschüttete Reku-Substrate können die maßgebenden Scherparameter durch klassische Scherversuche im Labor ermittelt werden; einen guten Orientierungswert gibt der Winkel der Gesamtscherfestigkeit fs´. Dies wurde durch die Feldversuche bestätigt. Diesem Sachverhalt sollte durch weitere Untersuchungen an verschiedenen Materialien, die als Reku-Substrat Verwendung finden könnten, nachgegangen werden.
- Reku-Schichten sind entsprechend der angestrebten Endmächtigkeit mit einem Überprofil herzustellen. Im vorliegenden Fall besaß dieses die Größenordung von 10 bis 15 % der angestrebten Endmächtigkeit.

6 Literatur

MEIER, J. (1999): Entwurf eines Deponietestfeldes. Diplomarbeit am Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe (TH), unveröffentlicht.

LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (1997): Forstwirtschaftliche Rekultivierung von Deponien mit TA-Siedlungsabfall-konformer Oberflächenabdichtung. Handbuch Abfall, Band 13. Bezug über JVA Mannheim, Druckerei.

WATTENDORF, P., KONOLD, W., EHERMANN, O. (HRSG.) (2003): Gestaltung von Rekultivierungsschichten und Wurzelsperren. Culterra 32, Schriftenreihe des Instituts für Landespflege der Albert-Ludwig-Universität, Freiburg.

DIN 18 137-3 (2002): Baugrund, Untersuchen von Bodenproben, Bestimmung der Scherfestigkeit, Teil 3: Direkter Scherversuch. Beuth Verlag, Berlin.

Bodeneigenschaften und Bodenleben in unterschiedlich aufgebauten Rekultivierungsschichten

Otto Ehrmann, Creglingen-Münster

Inhalt

1 Einleitung

Die Bodenstruktur hat wesentlichen Einfluss auf die Eignung eines Bodens als Standort für Pflanzen und Tiere. Umgekehrt wird die Bodenstruktur auch – vor allem auf Flächen auf denen keine permanente Bodenbearbeitung stattfindet – wesentlich von Organismen geprägt.

Bei einer Bodenumlagerung im Zuge einer Rekultivierung wird die ursprüngliche gewachsene Struktur eines Bodens zerstört, weiteren Schaden kann die Bodenstruktur durch Befahren/Verdichten im Zuge des Bodeneinbaus nehmen.

Im ersten Teil des Beitrags wird zum einen die Bodenstruktur kurz nach der Anlage des Versuchsfelds beschrieben. Zum anderen wird untersucht wie sich die Bodenstruktur dreieinhalb Jahre nach Anlage der Versuchsfelder verändert hat. Dazu werden jeweils Mikrofotos der Bodenstruktur sowie Messungen der Trockenraumdichte und des Eindringwiderstands gezeigt.

Im zweiten Teil wird untersucht wie Wurzeln und Regenwürmer mit diesen veränderten Bodenstrukturen zurechtkommen und welchen Einfluss sie auf die Bodenbildung in den beiden unterschiedlich aufgebauten Testfeldern nehmen.

2 Bodeneigenschaften im U und K-Feld kurz nach dem Bodeneinbau (Anfang 2001)

2.1 Makro- und Mikrostruktur des Bodens

Abbildung 1 zeigt die Entstehung der Bodenstruktur in den beiden Testfeldern K und U. Im K-Feld[2] sind durch den lagenweise verdichteten Einbau drei verdichtete Horizonte entstanden. Im U-Feld wurde der Boden vom oberen Testfeldrand ausgehend in einer Schicht „Vor-Kopf“ von einer leichten Raupe (D4) mit Moorkette eingeschoben. Auch im U-Feld entstanden Verdichtungen. Diese konzentrierten sich aber auf den Oberboden und waren am oberen, häufiger befahrenen Rand des Testfeldes intensiver (siehe auch Abbildung 5).

Mit dem bloßem Auge waren im Gelände kaum Unterschiede zwischen den beiden Testfeldern auszumachen. Mit mikromorphologischen Methoden kann der Boden bei einer wesentlich stärkeren Vergrößerung als im Gelände betrachtet werden. Diese Untersuchung erfolgte an ca. 0,03 mm „dicken“ Dünnschliffen. Aus den verdichteten Zonen des K-Feldes und Stellen gleicher Tiefe im U-Feld wurden im Mai 2001 Probenpaare entnommen.

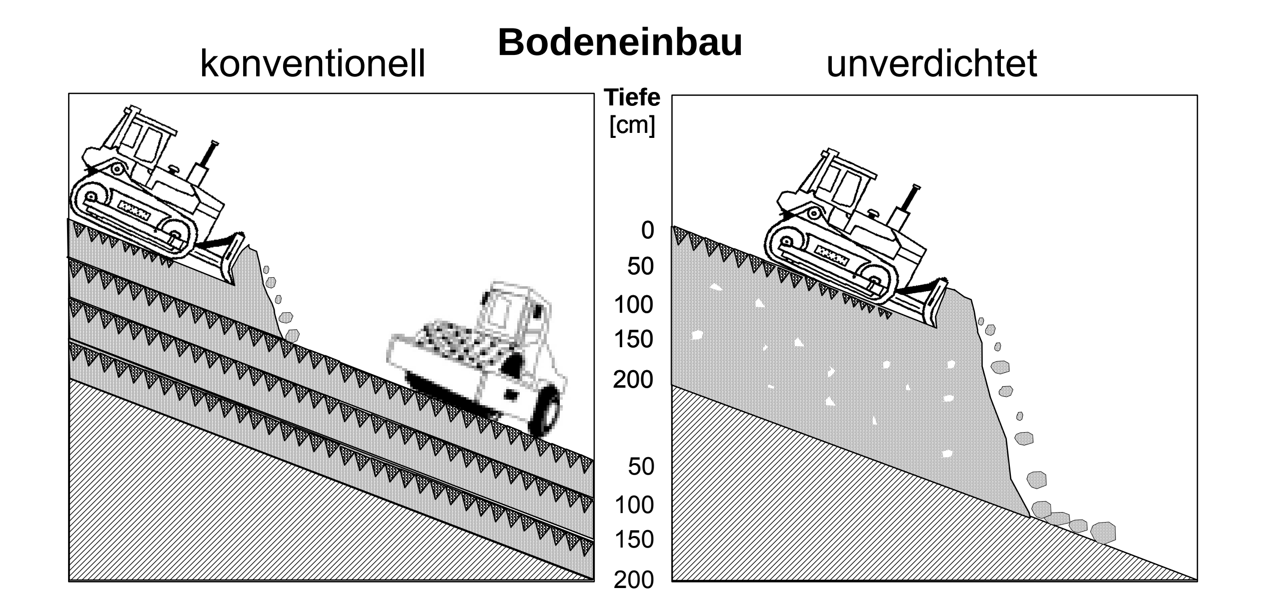
Gemeinsam ist den Dünnschliffen aus dem U- und K-Feld eine ähnliche Farbe, eine ähnliche Korngröße (Schluff/Ton) und das Vorkommen von Eisen-/Manganoxiden sowie von Tonbelägen. Diese Merkmale weisen darauf hin, dass der Boden in beiden Feldern die gleiche Herkunft hat. Die Dünnschliffe aus U- und K-Feld unterscheiden sich aber auch deutlich (Abbildung 2):

- Die Proben aus dem K-Feld sind viel dichter, große Hohlräume fehlen fast vollständig. Dies war an den Geländeprofilwänden nicht zu sehen, weil dort keine echten Schnitte hergestellt werden konnten, sondern nur Oberflächen betrachtet wurden. An einigen Stellen wurden im Dünnschliff Bodenbestandteile horizontal eingeregelt. Dies ist ein Hinweis auf eine hohe Druckbeanspruchung und als Folge dessen sind solche Stellen Hindernisse für Durchlüftung und Durchwurzelung sowie für Bodentiere.
- Im U-Feld sind durch die Umlagerung ohne Verdichtung zahlreiche neue Hohlräume zwischen den Bodenaggregaten entstanden. Daher ist der Boden lockerer als im Entnahmezustand vor der Umlagerung. Die Wände dieser künstlichen Hohlräume sind aber im Gegensatz zu Wurzel- oder Regenwurmröhren nicht verfestigt. Daher sind sie wesentlich weniger stabil und haben deshalb eine viel kürzere Lebensdauer als die Hohlräume im natürlich gewachsenen Unterboden.

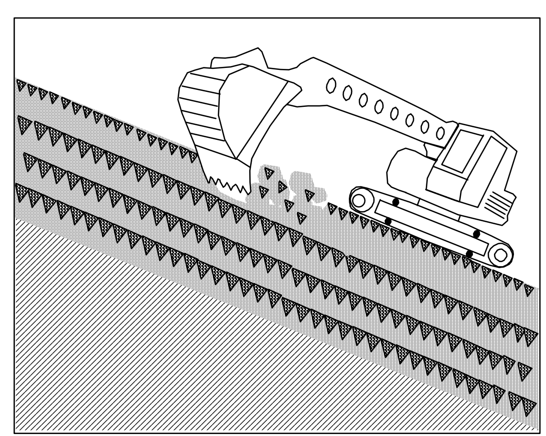
Messungen des Hohlraumvolumens am Dünnschliff zeigen im K-Feld eine dramatische Reduktion der für Transportprozesse von Wasser und Luft so wichtigen Grobporen (Abbildung 3). In der verdichteten Schicht gibt es so gut wie keine größeren Hohlräume mehr. Das U-Feld ist hingegen sogar deutlich hohlraumreicher als der natürlich gelagerte Vergleichsboden von einem ähnlichen Standort.

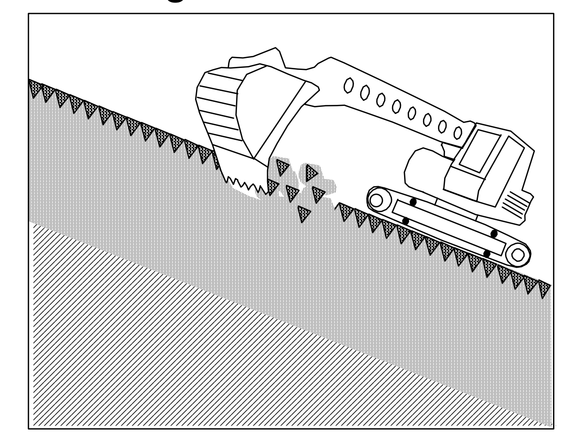
---

[2] Die Versuchsanlage „Leonberger Lysimeterfelder“ besteht im Wesentlichen aus zwei Großlysimetern mit jeweils circa 360 m² Fläche, in die im Herbst 2000 die Varianten „unverdichtet eingebaute Rekultivierungsschicht“ (Feld U) und „konventionell verdichtete Rekultivierungsschicht“ (Feld K) eingebaut wurden.

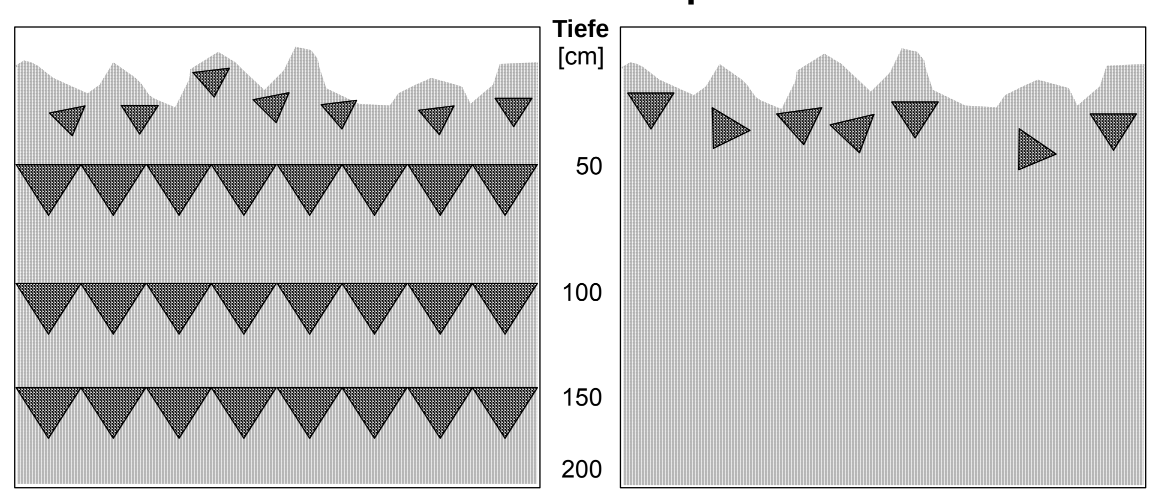


Oberflächenlockerung





Aufbau der Bodenprofile



▼ = verdichtete Bereiche; je größer die Signatur, um so intensiver ist die Verdichtung

Abbildung 1: Bodeneinbau, Oberbodenlockerung und Entstehung der Bodenstruktur in den Testfeldern K (links) und U (rechts)

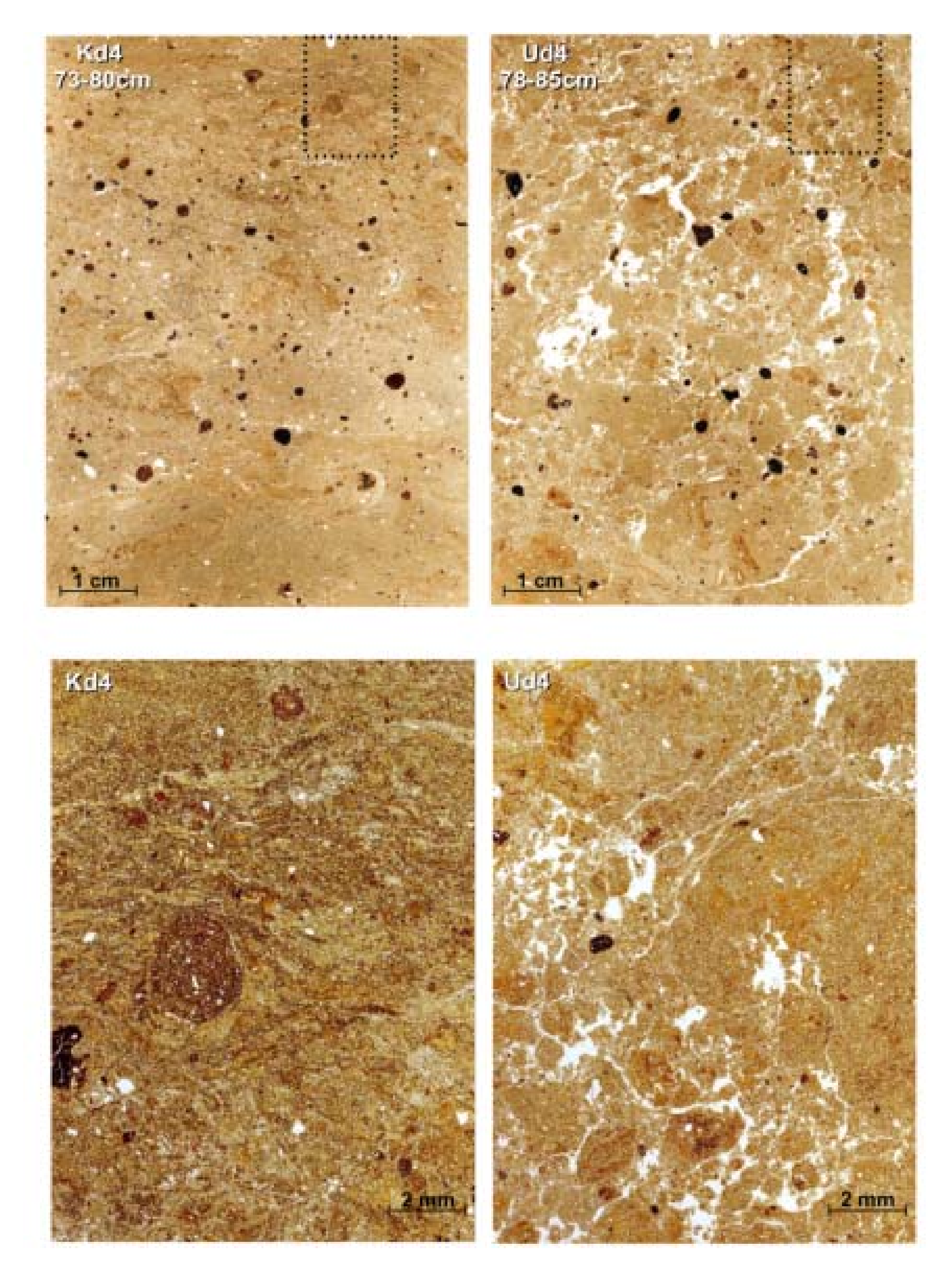


Abbildung 2: Dünnschliffe aus dem mittleren verdichteten Horizont des K-Feldes (73-80 cm, links) und aus einer ähnlichen Tiefe im U-Feld (rechts), oben: Übersichtsaufnahmen (jeweils 7 cm hoch), unten: Detailansicht (Bildhöhe 1,5 cm, der Ausschnitt ist im oberen Bild eingezeichnet). Bei den zahlreichen dunklen Punkten handelt es sich um Eisenkonkretionen. Sie sind typisch für tonreichere Lössböden. Der Boden im U-Feld besitzt viel mehr Hohlräume (weiß) als der Boden im K-Feld. Auch in der Detailaufnahme zeigt sich das unterschiedliche Hohlraumvolumen der beiden Testfelder. Im dichteren Boden aus dem K-Feld sind außerdem schlierenförmig eingeregelte Tonbeläge zu sehen – eine Folge der hohen Verdichtung.

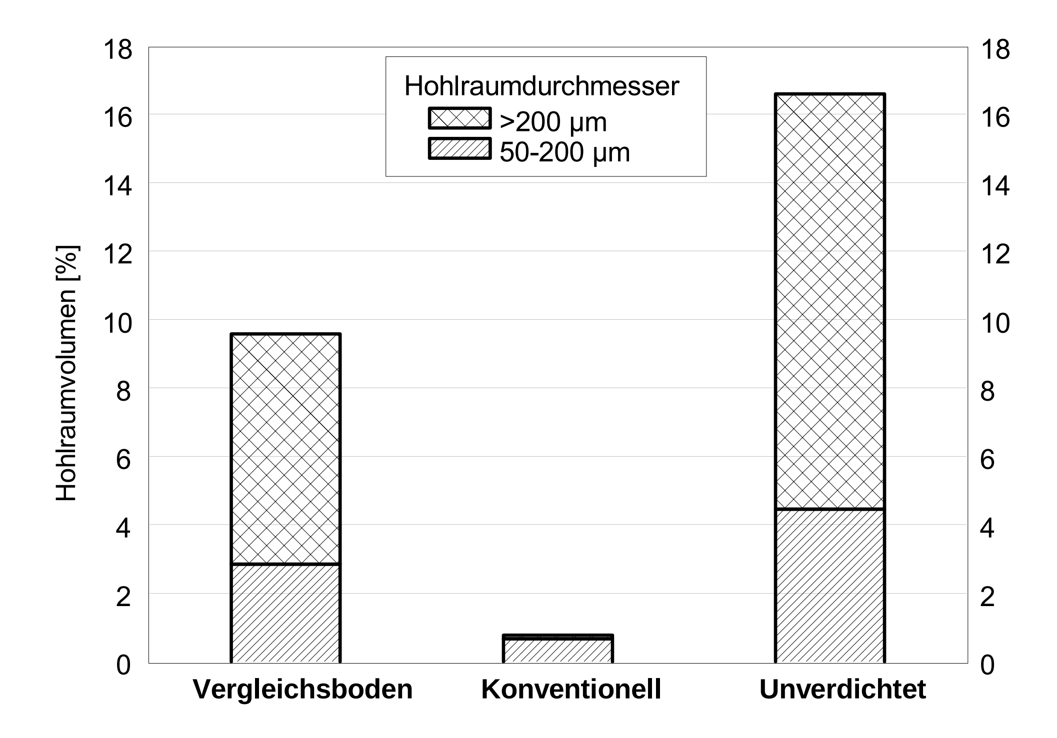


Abbildung 3: Hohlraumvolumen einer verdichteten Schicht im K-Feld - sowie Vergleich mit dem U-Feld und einem natürlich gewachsenen Vergleichsboden.

2.2 Trockenraumdichten kurz nach dem Bodeneinbau (Anfang 2001)

Ein wichtiges Merkmal zur Beurteilung schonender Bodeneinbauverfahren ist die Trockenraumdichte (ρd) eines Substrates, bodenkundlich auch als Lagerungsdichte bezeichnet. Sie hat einen großen Einfluss auf den Wasserhaushalt des Bodens. Es ist deshalb interessant, die beiden Einbauverfahren unverdichtet (U-Feld) und konventionell verdichtet (K-Feld) in ihrer Wirkung auf diesen Parameter zu vergleichen.

Die beiden Varianten K- und U-Feld unterscheiden sich kurz nach dem Einbau deutlich bezüglich der Trockenraumdichte (Abbildungen 4 und 5):

- Im U-Feld sind im Mittel in allen vier Tiefenstufen die Trockenraumdichten immer deutlich niedriger als im K-Feld.
- Vergleicht man die mittleren Trockenraumdichten in den Testfeldern nach dem Einbau mit der Dichte im Entnahmezustand, die bei der Anlieferung des Bodenmaterials bestimmt wurde, so zeigen sich ebenfalls Unterschiede. Die Trockenraumdichten im U-Feld liegen etwas (in 25 und 50 cm Tiefe) beziehungsweise deutlich (in 85 und 135 cm) unter der Entnahmedichte. Die Dichte im K-Feld ist immer deutlich höher als bei der Bodenentnahme. Im U-Feld wurden also beim Bodeneinbau in der Summe Hohlräume geschaffen, im K-Feld dagegen Hohlräume vermindert.
- Im U-Feld gibt es einen deutlichen Tiefengradienten. Der Boden wird von oben (25 cm Tiefe) nach unten (135 cm) lockerer. Grund hierfür ist das Befahren des Oberbodens beim Einschieben der Rekultivierungsschicht. Diese Art von Gradient ist günstig, weil der Oberboden viel leichter mechanisch gelockert werden kann und durch biotische und abiotische Prozesse eher Hohlräume gebildet werden als im Unterboden.

Innerhalb eines Testfeldes gibt es ebenfalls deutliche Unterschiede (Abbildung 5):

- Die Trockenraumdichte ist umso höher, desto näher am oberen Testfeldrand die Messstelle liegt. Dies zeigt sich (mit wenigen Ausnahmen) beim Vergleich aller vier Messstellen und wird noch deutlicher wenn man jeweils die zeitgleich beprobten Messstellen a/c und b/d miteinander vergleicht.
- Diese Tendenz gilt sowohl für den Ober- als auch für den Unterboden.
- Die Unterschiede zwischen Oberhang und Unterhang sind naturgemäß beim unverdichteten Einbau größer als beim konventionell verdichteten Einbau.

Ebenso wie alle konventionellen Einbauverfahren ist auch das in Leonberg praktizierte Verfahren „Vor-Kopf-Verschieben" des Bodenmaterials vom oberen Testfeldrand aus mit einer im Böschungsverlauf abnehmenden Zahl von unvermeidbaren Befahrungen und somit einer Oberbodenverdichtung vor allem im oberen Teil des Testfeldes verbunden.

Daraus kann gefolgert werden, dass mit zunehmender Böschungslänge der Boden beim Einbau immer stärker verdichtet wird. Daher ist das praktizierte Verfahren Vor-Kopf-Verschieben nur bei nicht wesentlich längeren Böschungen als in Leonberg, also 40 bis 50 m, sinnvoll anwendbar. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass auch die Art des Bodenmaterials und die Bodenfeuchte einen wesentlichen Einfluss auf die Verdichtbarkeit haben.

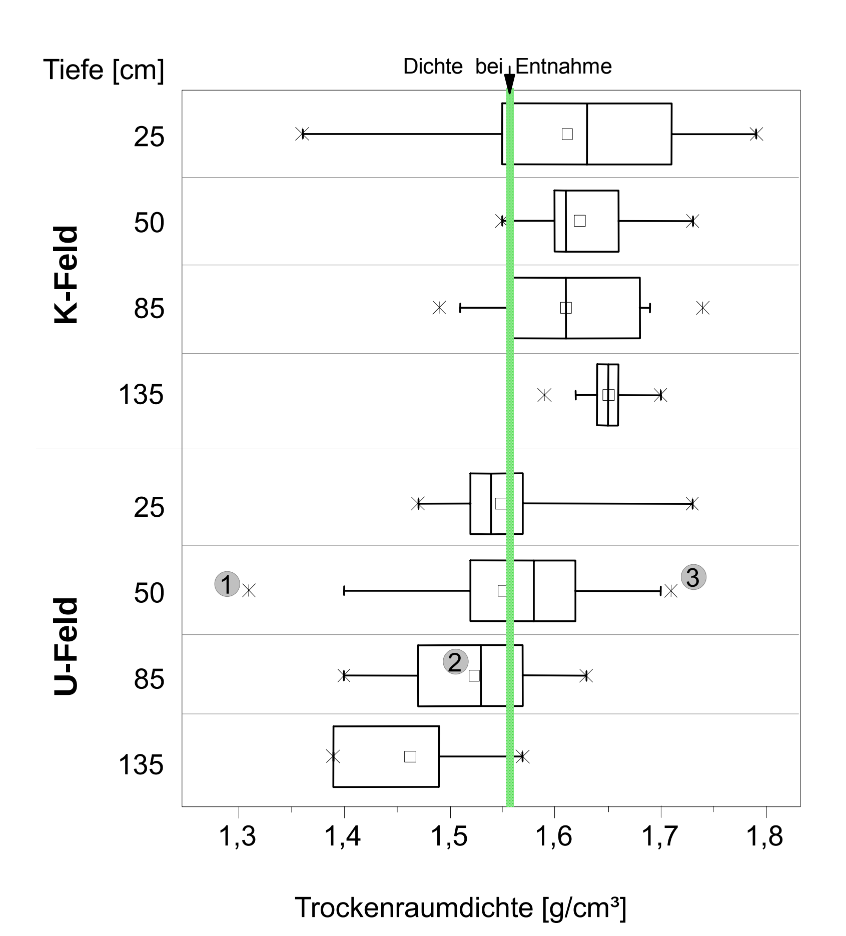


Abbildung 4: Mittelwerte der Trockenraumdichten bei verdichtetem (K-Feld) und unverdichtetem Einbau (U-Feld) der Rekultivierungsschicht kurz nach dem Einbau (Mittelwerte aller vier Messstellen; Boxplots = 25/75 %-Intervall mit Median, Linien = 5/95 %-Intervall, 1 = Minimum-, 2 = Mittel-, 3 = Maximumwert)

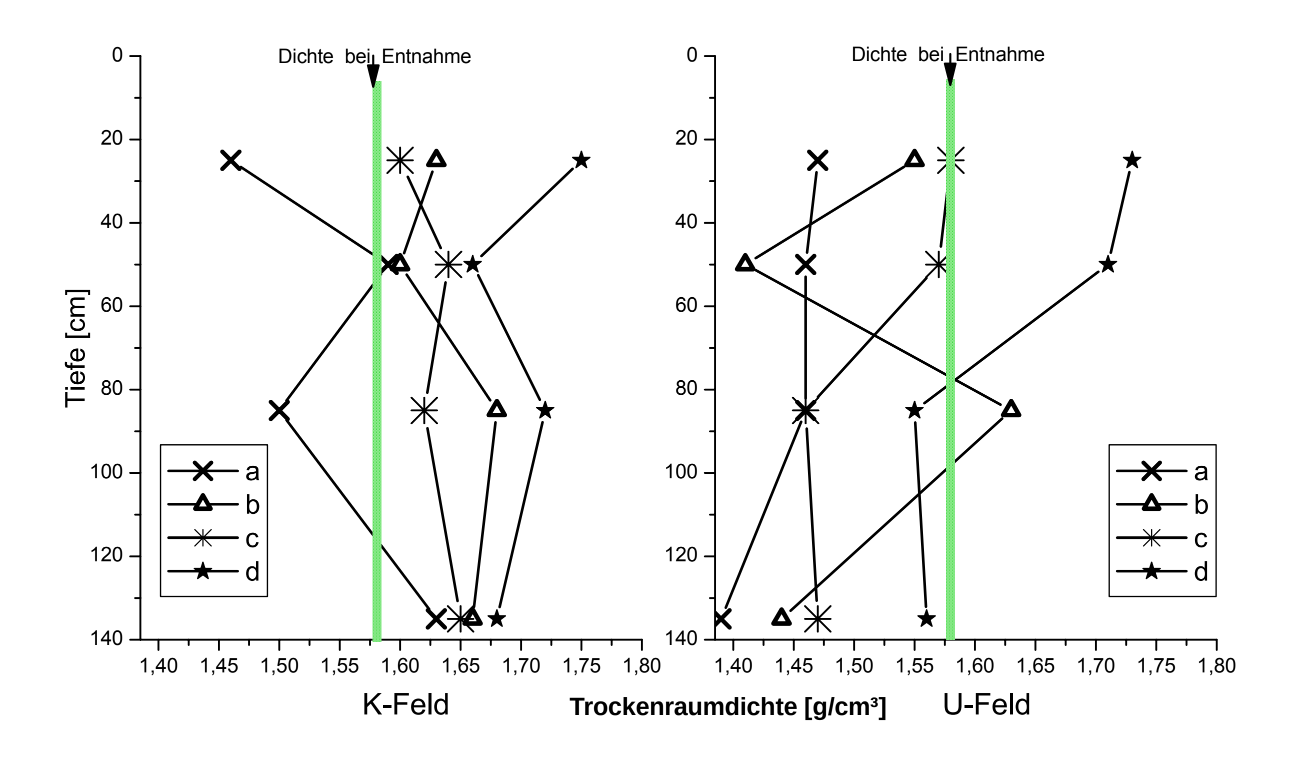


Abbildung 5: Trockenraumdichten an je vier Messstellen im K- und U-Feld. Die Messstelle liegen jeweils ca. 10 m auseinander. Die Messstelle a liegt am Unterhang, die Messstelle d am Oberhang. Die anderen liegen in alphabetischer Reihenfolge dazwischen. Die Beprobung fand im Januar (a, c) bzw. im Juni 2001 (b, d) statt.

2.3 Eindringwiderstände kurz nach den Bodeneinbau (Anfang 2001)

Mit dem Eindringwiderstand können verdichtete Zonen im Boden charakterisiert werden, damit erlaubt dieser Parameter auch Aussagen über die Durchwurzelbarkeit eines Bodens. Die Aussagekraft ist jedoch mit Einschränkungen versehen, weil Wurzelspitzen einen viel kleineren Durchmesser als Penetrometerspitzen haben und auch gezielt in kleine Risse und Hohlräume zwischen Körnern oder Aggregaten einwachsen können. Weiterhin hängt die Durchwurzelung von einer Reihe anderer Faktoren, wie beispielsweise der Wasser- und Sauerstoffversorgung des Bodens ab.

Der Eindringwiderstand wurde mit einem Handpenetrometer (Proctornadel) an Aufschlüssen senkrecht zur Profilwand in Tiefenstufen von 5 cm und jeweils acht Einzelmessungen pro Tiefenstufe bestimmt. Die ersten Messungen wurden bei Aufgrabungen in den Testfeldern Ende Dezember 2000/Anfang Januar 2001 (Profile a und c) und Ende Mai/Anfang Juni 2001 (Profile b und d) durchgeführt.

Die Ergebnisse werden als relative Werte dargestellt. Der höchste gemessene Wert einer Messperiode, innerhalb der jeweils mit dem gleichen Gerät und gleichen Spitzen gearbeitet wurde, ist mit 100 % angesetzt.

Die in Abbildung 6 dargestellten Ergebnisse zeigen trotz der erwarteten hohen Streuung der Einzelmessungen deutliche Unterschiede zwischen den beiden Einbauvarianten:

- Im Unterboden, in mehr als 75 cm Tiefe, sind die Eindringwiderstände im K-Feld immer größer als im U-Feld. Im Oberboden sind dagegen die Unterschiede geringer.

Gründe hierfür sind die in beiden Feldern gleiche Oberbodenlockerung und, bei der Messung im Juni, die oberflächliche Austrocknung der Böden (siehe unten) .

- Verdichtete Zonen sind im U-Feld nicht zu erkennen. Im K-Feld treten sie aber sehr deutlich bei der ersten Messserie (22.12.2000 und 9.1.2001) und weniger deutlich bei den späteren Messungen hervor. Ob diese Unterschiede zwischen dem ersten und zweiten Messtermin die Folge einer Bodenentwicklung im K-Feld sind oder, was wahrscheinlicher ist, als Ursache eher kleinräumige Heterogenitäten in Frage kommen, kann derzeit nicht eindeutig beantwortet werden

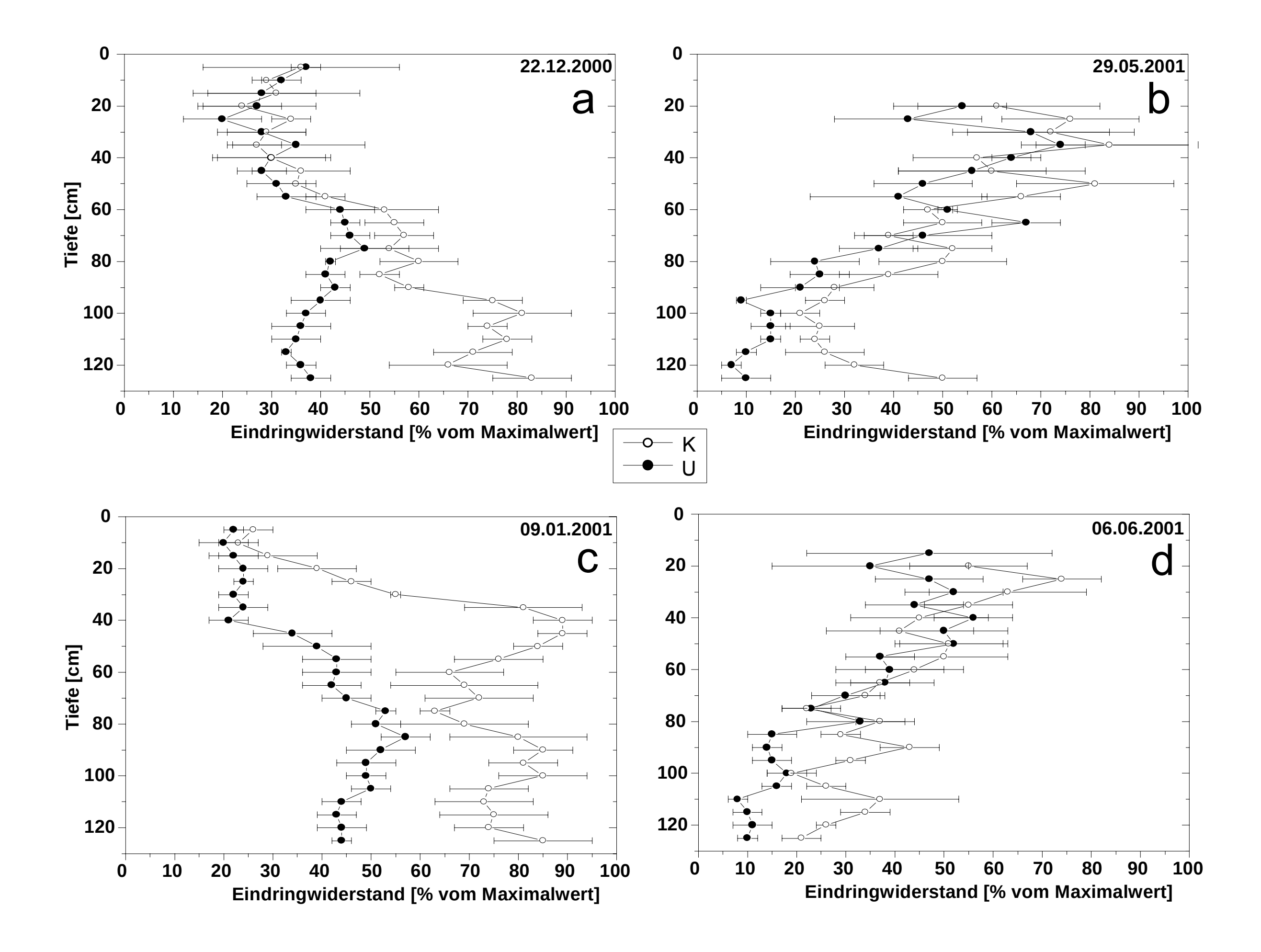


Abbildung 6: Eindringwiderstände in je vier Profilen des K- und U-Feldes; in jeder Tiefe sind jeweils Mittelwert und Standardabweichung dargestellt (n=8

3 Bodeneigenschaften im U und K-Feld drei bis dreieinhalb Jahre nach dem Einbau

3.1 Mikrostruktur im Oberboden

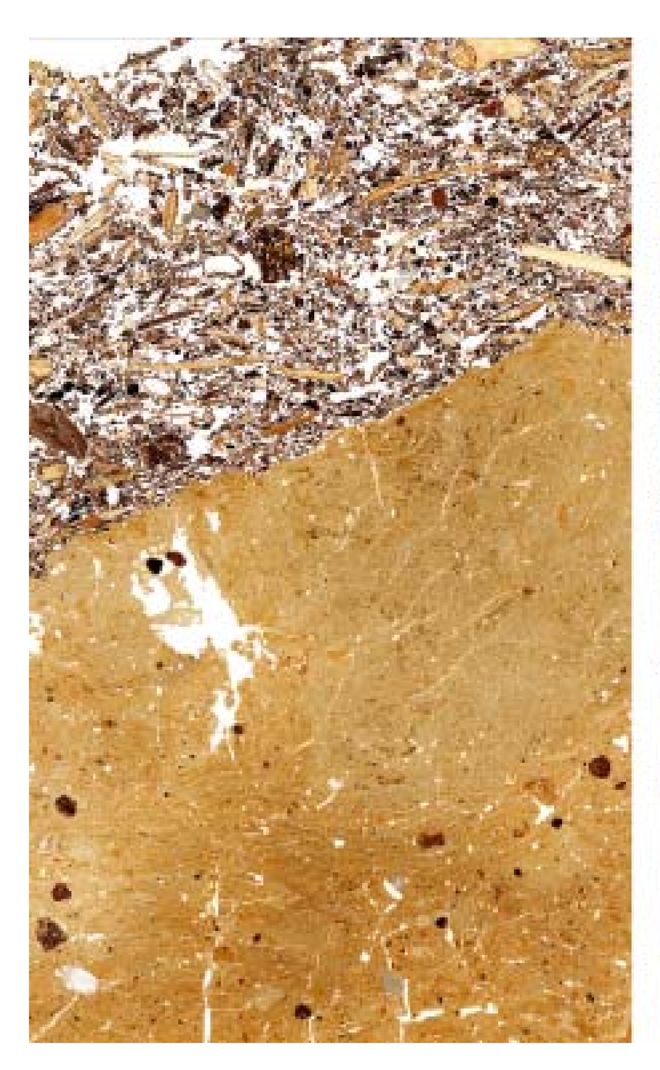


Abbildung 7a:
Übersicht Dünnschliff Versuchsfläche Mai 2001 (Bildbreite 45 mm, Bildhöhe 75 mm)

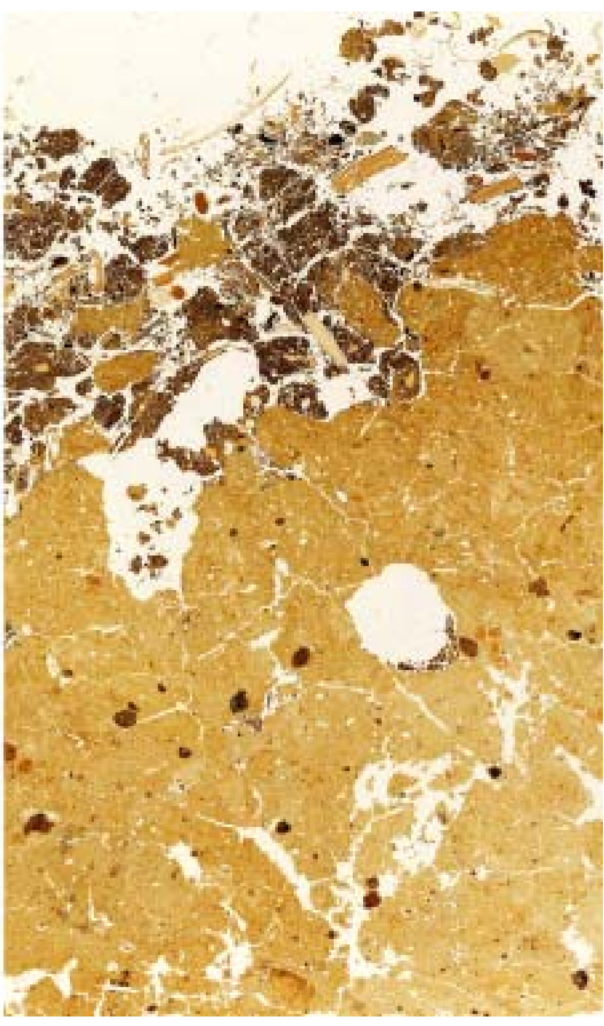


Abbildung 7b:
Übersicht Dünnschliff Versuchsfläche November 2003 (Bildbreite 45 mm, Bildhöhe 75 mm)

In diesem Abschnitt wird nur die Entwicklung des Oberbodens im U-Feld betrachtet. Verglichen wird die Mikrostruktur kurz nach dem Bodeneinbau mit der Situation nach drei Jahren (November 2004):

Kurz nach der Anlage der Testfelder (Abbildung 7a) liegt der ausgebrachte Kompost ± unverändert auf der Bodenoberfläche. Der Boden weist nur einen größeren Hohlraum aber zahlreiche sehr kleine Risse auf. Bei den letzteren handelt es sich um Frost- oder Trockenrisse.

Drei Jahre später (Abbildung 7b) liegt schon deutlich weniger Kompost auf der Bodenoberfläche, er wurde von Organismen umgewandelt. Reste des Komposts liegen in Form von runden Aggregaten auf der Bodenoberfläche. Bei diesen handelt es sich um Regenwurmlosungen. Die Bodenoberfläche ist jetzt deutlich rauer, dies fördert Austauschprozesse zwischen Boden und Atmosphäre. Der Oberboden ist wesentlich hohlraumreicher als kurz

nach der Anlage. Auffällig sind zwei große Hohlräume. Es handelt sich dabei um eine quer und eine längs angeschnittene Regenwurmröhre.

Drei Jahre nach der Anlage haben sich im Oberboden also deutliche Veränderungen ergeben. Abiotische Prozesse (Rissbildung) und biotische Prozesse (Abbau des Komposts, Anlage von Röhren durch Organismen) sind gleichermaßen daran beteiligt.

3.2 Trockenraumdichte dreieinhalb Jahre nach dem Einbau (April 2004)

Im Frühjahr 2004 wurden, um die Versuchsanlage hinsichtlich einer langfristigen Nutzung zu schonen, nur im Oberhang der Testfelder auf Höhe der Messstellen d Aufgrabungen durchgeführt und die Trockenraumdichte und der Eindringwiderstand bestimmt. Dabei zeigte sich bei der Trockenraumdichte folgende Entwicklung (Abbildung 8):

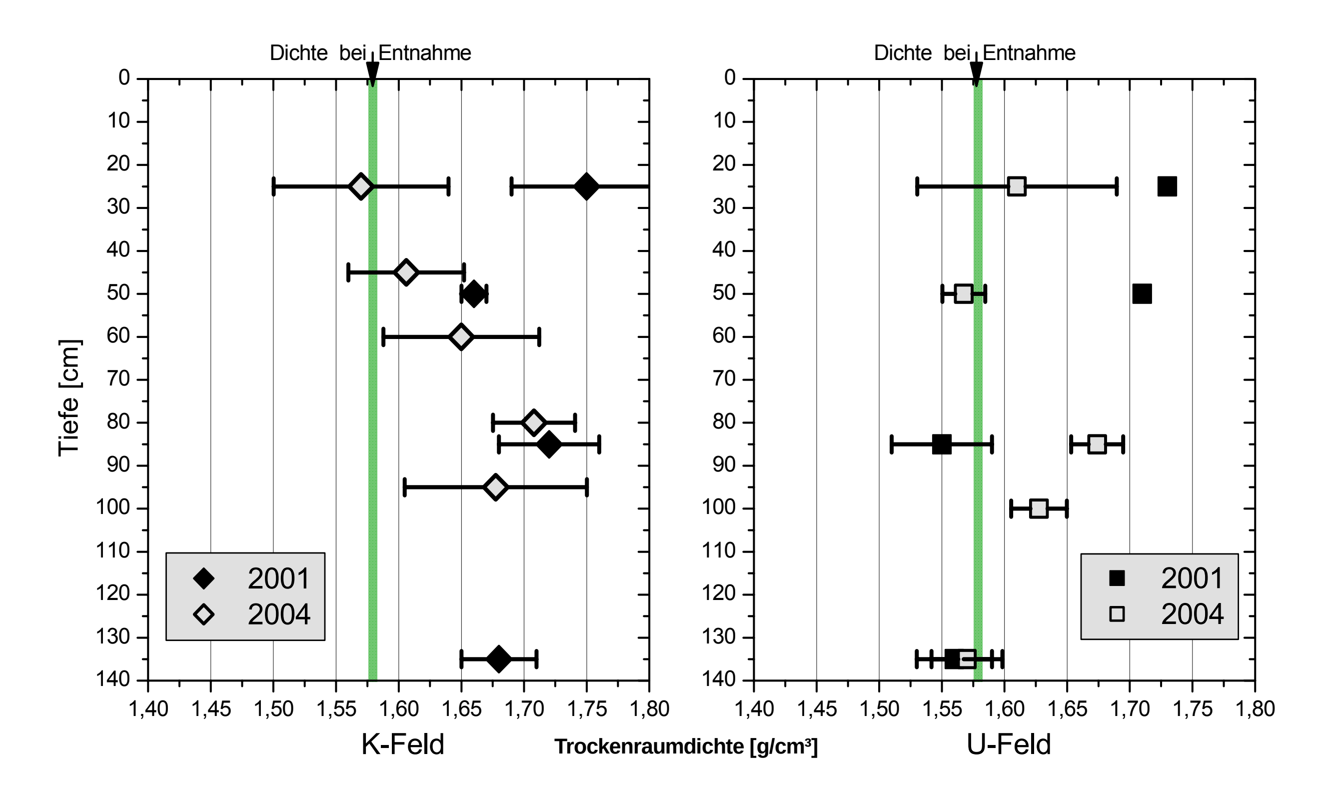


Abbildung 8: Vergleich der Trockenraumdichten von 2001 mit 2004 am Profil d

- Im Oberboden (25 und 50 cm Tiefe) ist die Trockenraumdichte im Frühjahr 2004 sowohl im U- als auch im K-Feld deutlich niedriger als im Jahre 2001. Es wurden also neue Hohlräume geschaffen. Diese können durch Bodenorganismen aber auch durch Quellen und Schrumpfen sowie Frosteinwirkung entstanden sein.
- Im Unterboden (tiefer als 80 cm) veränderte sich im K-Feld die Dichte gegenüber 2001 praktisch nicht. Im U-Feld wurde der Boden in 90 bis 100 cm Tiefe dichter, in 135 cm Tiefe änderte sich die Dichte ebenfalls nicht.
- Die Unterschiede zwischen U- und K-Feld waren im Oberboden schon im Juni 2001 durch die Oberbodenlockerung nach dem Bodeneinbau relativ gering. Im Unterboden haben sie sich seitdem angenähert. Dies ist die Folge der an beiden Profilen ähnlich

wirkenden Standortsfaktoren. Das K-Feld ist aber im Unterboden immer noch deutlich dichter als das U-Feld.

- Im Jahr 2004 liegen die Trockenraumdichten des Oberbodens mittlerweile im Bereich der Entnahmedichte, was für einen Oberboden aber immer noch sehr dicht ist. Im Unterboden wird die Entnahmedichte im K-Feld immer deutlich überschritten, ebenso im U-Feld mit Ausnahme der Probestelle in 140 cm Tiefe.

Insgesamt hat also nach der Bodenumlagerung das Hohlraumvolumen durch Setzungen abgenommen. Ursache ist vermutlich die geringe Gefügestabilität des eingebauten humusarmen Löss-Unterbodens und die bisher geringe biotische Neubildung von Hohlräumen.

3.3 Eindringwiderstände dreieinhalb Jahre nach dem Bodeneinbau (April 2004)

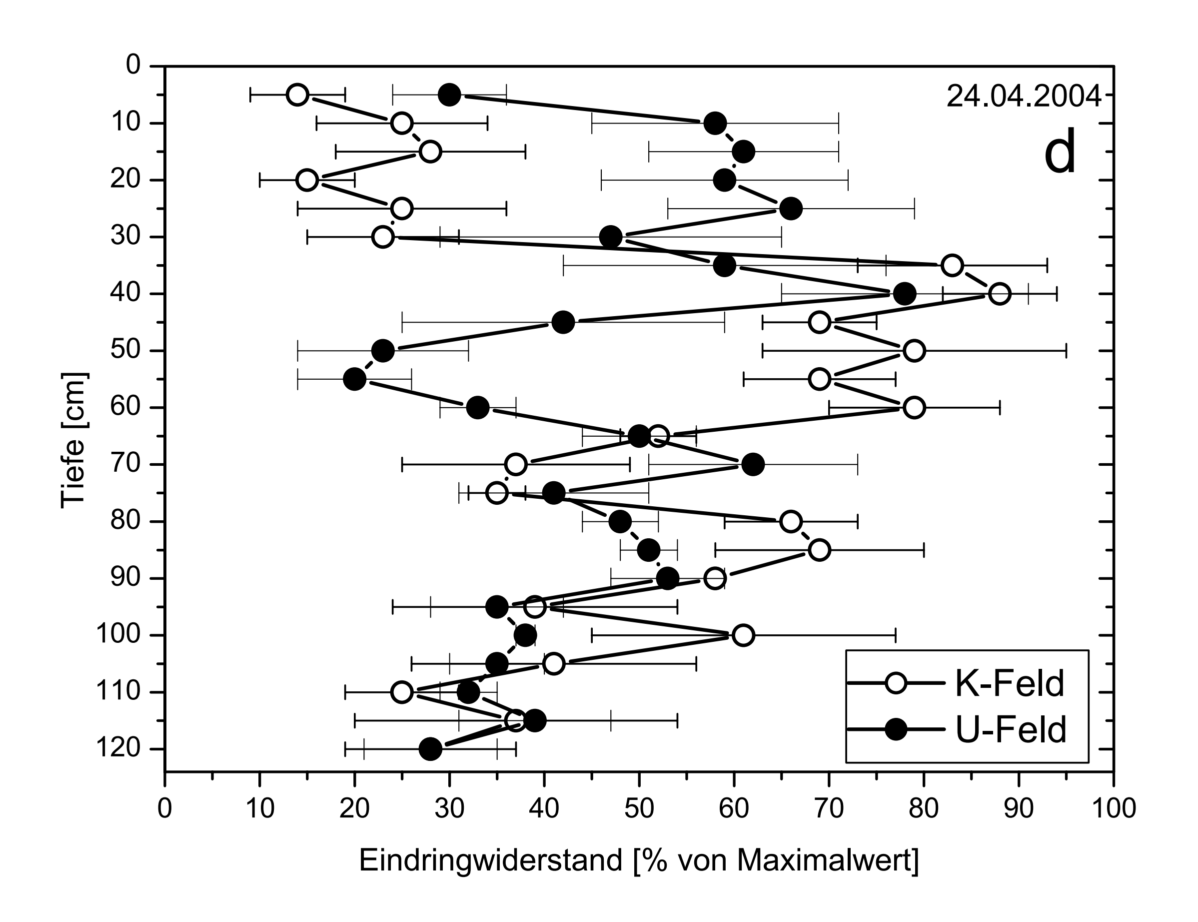


Abbildung 9: Eindringwiderstände am Profil (Höhe Messstelle d) im April 2004; in jeder Tiefe sind jeweils Mittelwert und Standardabweichung dargestellt.

Im Frühjahr 2004 wurde nur in einem Profil auf Höhe der Messstelle d gemessen. Die in Abbildung 9 dargestellten Ergebnisse zeigen auch nach dreieinhalb Jahren deutliche Unterschiede zwischen den beiden Einbauvarianten:

- Im Oberboden – bis 30 cm Tiefe – sind die Eindringwiderstände im U-Feld höher. Die Ursache ist weniger Verdichtung, denn in beiden Feldern wurde die gleiche Oberbodenlockerung durchgeführt, sondern vor allem die unterschiedliche Bodenfeuchte. Aufgrund der intensiveren Durchwurzelung ist der Oberboden im U-Feld stärker ausgetrocknet.

Unterhalb von 35 cm Tiefe sind die Eindringwiderstände im K-Feld, obwohl der Boden dort feuchter ist, fast immer größer als im U-Feld.

- Verdichtete Zonen sind im K-Feld deutlich zu erkennen: Zwischen 35 und 60 cm nehmen die Eindringwiderstände deutlich zu und in geringerem Umfang auch noch einmal zwischen 80 und 100 cm. Diese Tiefen decken sich mit der ersten und zweiten verdichteten Lage beim Einbau. Im U-Feld ist eine kleine Verdichtung in 70 cm Tiefe zu erkennen.
- Unterhalb 110 cm Tiefe nähern sich die Eindringwiderstände beider Felder wieder an.

Fazit Bodenstruktur dreieinhalb Jahre nach Anlage der Versuche

Die Bodenstruktur beider Versuchsflächen hat sich durch gleich wirkende Standortsfaktoren teilweise angeglichen:

- Im Oberboden erfolgte vor allem durch abiotische Prozesse (Quellen/Schrumpfen, Frost) eine Lockerung des Oberbodens. Förderlich war hier sicherlich das sehr trockene Jahr 2003.
- Im Unterboden sind im U-Feld die beim unverdichteten Einbau gebildeten künstlichen Hohlräume mittlerweile zum größten Teil kollabiert. Neue Hohlräume wurden wohl nicht gebildet.

Zwischen U- und K- Feld gibt es aber beim Parameter Eindringwiderstand immer noch große Unterschiede. Die verdichteten Schichten lassen sich deutlich nachweisen. Vergleicht man die Eindringwiderstände der Jahre 2001 und 2004 so zeigt sich, dass die vor allem im K-Feld beim Bodeneinbau entstandenen Verdichtungen bisher nicht aufgelöst wurden. Erfahrungen aus natürlichen Böden zeigen, dass Verdichtungen im Unterboden über eine sehr lange Zeit (> 100 Jahre) bestehen können.

Ungünstig ist aber in beiden Feldern, dass durch die Bodenumlagerung alle größeren kontinuierlichen Poren (beispielsweise Regenwurmröhren) zerstört wurden. Im U-Feld kann daher die Bodenstruktur nicht als wirklich gut bezeichnet werden Trotzdem ist das U-Feld der wesentlich bessere Pflanzenstandort, weil flächige horizontale Verdichtungen wie im K-Feld dort nicht vorkommen. Die besseren Struktureigenschaften des U-Feldes werden auch durch die intensivere Durchwurzelung und die größere Zahl von Regenwurmröhren deutlich. Diese beiden Themen werden in den folgenden beiden Kapiteln ausführlich behandelt.

Eine Verbesserung der Bodenstruktur im Unterboden ist nicht durch eine nachträgliche mechanischen Lockerung, wie sie in der Landwirtschaft praktiziert wird, möglich. Diese ist am Hang kaum auszuführen und wegen der vorhandenen Bepflanzung unmöglich. Eine Verbesserung kann nur die allmähliche biotische und abiotische Gefügeregeneration bringen. Hierzu dürfen aber die Ausgangsbedingungen nicht zu ungünstig sein. Daher ist ein schonender Einbau des Bodens notwendig.

4 Wurzeln und Regenwürmer in unterschiedlich aufgebauten Rekultivierungsschichten

Das Vorkommen bzw. die Verteilung von Regenwürmern und Wurzeln im Boden ist ein hervorragender Indikator für die Qualität eines Standortes. So haben gut aggregierte und durchlüftete Böden in der Regel eine tiefreichende Durchwurzelung und zahlreiche Regenwürmer. Hingegen ist das Wurzelwachstum in verdichteten Böden stark eingeschränkt und es kommen in der Regel weniger Regenwürmer vor.

Die Röhren von Wurzeln (erst nach dem Absterben) und von Regenwürmern haben prinzipiell Anschluss an die Bodenoberfläche. Sie sind durch randliche Verfestigung – dies gilt insbesondere für Regenwurmröhren - wesentlich stabiler als abiotisch gebildete Hohlräume (z.B. Frost- oder Trockenrisse) und auch viel dauerhafter als mit technischen Geräten angelegte Hohlräume (siehe Tabelle 2).

Aus diesen Gründen wurde das Vorkommen von Regenwürmern und Wurzeln im Boden untersucht.

4.1 Durchwurzelung von U- und K-Feld dreieinhalb Jahre nach dem Bodeneinbau

Die Durchwurzelung des Bodens kann, vor allem in größerer Tiefe, mit hinreichender Genauigkeit nur an Profilwänden in Aufschlüssen ermittelt werden. Diese Methode ist dementsprechend aufwändig und destruktiv, sie kann in den auf Langzeitbetrieb ausgelegten Leonberger Lysimeterfeldern nicht in beliebiger Zahl wiederholt werden. Die Wurzeln in den Testfeldern wurden im April 2004 in jeweils 250 cm² (5 x 50 cm) großen Probeflächen in 10-cm-Tiefenstufen mindestens bis zur tiefsten im Aufschluss erkennbaren Wurzel an der Profilwand freipräpariert und ausgezählt.

Der Boden des U-Feldes ist deutlich tiefer und intensiver durchwurzelt (Abbildung 10) als der des K-Feldes. Während im K-Feld die Durchwurzelung des Unterbodens nur bis 65 cm Tiefe reicht, wurden im U-Feld Wurzeln noch 110 cm unter der Bodenoberfläche gefunden. Aus Abbildung 10 wird ebenso deutlich, dass die Durchwurzelung im U-Feld im gesamten Profil intensiver ist. So finden sich im Unterboden zwischen 50 und 110 cm Tiefe im K-Feld durchschnittlich 0,3 lebende Wurzeln pro 100 cm², im U-Feld dagegen 2,2.

Die Durchwurzelung im K-Feld wird vermutlich sowohl mechanisch – durch höhere Dichte – und physiologisch – durch Sauerstoffmangel – erschwert.

Eine direkte Korrelation zwischen der Durchwurzelung und den Bodendichten in der vertikalen Profilausdehnung konnte aber nicht festgestellt werden. Obwohl in den Profilen im K- und U-Feld Trockenraumdichten in der gleichen Größenordnung gemessen wurden (siehe 3.2), z.B. in 45 bzw. 50 und 80 bzw. 85 cm Tiefe, sind die Profile unterschiedlich gut durchwurzelt. Dies ist ein Hinweis darauf, dass im K-Feld wohl eher die horizontal orientierten Schichtgrenzen mit reduziertem und gestörtem Porensystem die Durchwurzelung hemmen und weniger die geringfügig und offensichtlich höchstens lokal (an der Schichtgrenze) höheren Trockenraumdichten. Aufgrund der geringen räumlichen Auflösung der Bestimmungsmethode mit Stechzylindern können solche Verdichtungen offensichtlich nicht erfasst werden. Eine bessere Übereinstimmung zwischen Durchwurzelung und physikalischen Bodeneigenschaften zeigt Abbildung 10 anhand des Eindringwiderstandes. Vor allem im Unterboden gehen hohe Eindringwiderstände meist mit schwacher Durchwurzelung einher.

Auch die zuvor angesprochene Verdichtung im U-Feld in circa 65 cm Tiefe tritt hier deutlich zu Tage. Diese Methode erscheint – zumindest bei der im Leonberg vorherrschenden Bodenart – besser geeignet, wurzelhemmende Schichten zu detektieren. Dies ist teilweise sicher auch darauf zurück zu führen, dass der Eindringwiderstand mit viel höherer räumlicher Auflösung gemessen werden kann als die Trockenraumdichte

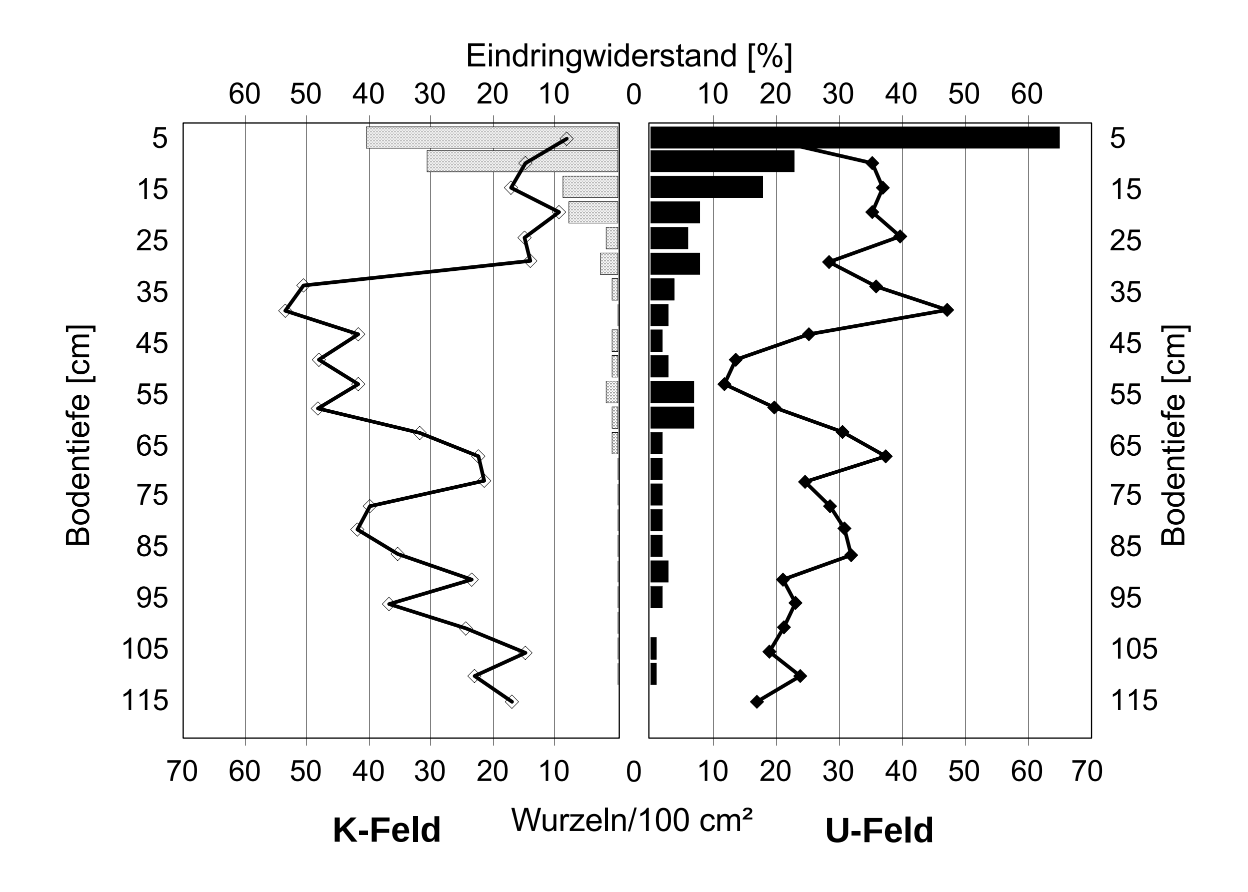


Abbildung 10: Durchwurzelung des Bodens (Anzahl lebender Wurzeln/100 cm² als Balken) und Eindringwiderstand [% des Maximalwerts, als Linie] im April 2004; die Aufschlüsse liegen am Oberhang auf Höhe der Messstellen Ud/Kd.

4.2 Entwicklung der Regenwurmpopulation nach Bodeneinbau

Innerhalb der in Europa etwa 50.000 Arten umfassenden Gruppe der Bodentiere nehmen die Regenwürmer mit mehreren 100 Arten hinsichtlich der Artenzahl nur einen kleinen Anteil ein. Eine herausragende Stellung innerhalb der Bodentiere haben sie aufgrund ihrer Biomasse und Funktion. In vielen Böden Mitteleuropas sind sie die Tiergruppe mit der höchsten Biomasse (DUNGER 1983).

Der beim Einbau der Testfelder im November 2000 angelieferte Boden wurde mit einer Handauslese auf Regenwürmer durchsucht (nach EHRMANN & BABEL 1991). Dabei wurde der Zustand der Regenwürmer („verletzt“ / “unverletzt“) bonitiert.

Bei allen Regenwurmuntersuchungen nach dem Einbau der Substrate in die Testfelder wurden die Regenwürmer mit einer Kombination aus Elektromethode (1/8 m² Untersuchungsfläche, Thielemann 1986) und nachfolgender Handauslese einer Teilfläche (1/30 m², bis 30

cm Tiefe) durchgeführt. An jedem Standort wurde diese Methodenkombination sechs Mal wiederholt.

Einfluss der Bodenumlagerung auf Regenwürmer

Der bei der Herstellung der Rekultivierungsschicht gelieferte Boden enthielt Regenwürmer aus allen drei ökologischen Gruppen (siehe Tabelle 1). Die Biomasse war zwar mit ca. 24 g/m² – verglichen mit ähnlichen Standorten in Baden-Württemberg – um den Faktor 10 (Grünland) beziehungsweise Faktor 3 (Wald) geringer, sie hätte aber prinzipiell für die Entwicklung einer standortgerechten Population innerhalb einiger Jahre ausgereicht.

Durch Umlagerung und Einbau des Bodens in die Lysimeterfelder wurden die Regenwurmpopulationen so stark dezimiert, dass im Frühjahr 2001, ein halbes Jahr nach Fertigstellung der Versuchsanlage, keine Regenwürmer mehr zu finden waren (Tabelle 1).

Tabelle 1: Biomasse der Regenwürmer in den Versuchsfeldern Leonberg (Mittelwerte K- und U-Feld; alle Angaben in Gramm Frischmasse je m²)

ökologische Gruppe	epigäisch	endogäisch	anezisch	Summe
angeliefert (Herbst 2000)	10,7	9,5	3,3	23,5
Annahme: überlebensfähig*	0,8	0,7	0,2	1,8
Fang im Frühjahr 2001	0,0	0,0	0,0	0,0
∅ von Standorten mit ähnlicher Körnung (Löss) in Baden-Württemberg				
a) Grünland	7	102	157	266
b) Wald	7	30	29	66
* Annahme: nur nicht schwer verletzte Regenwürmer in der Tiefe 0 – 50 cm überleben,				

Für den Zusammenbruch der Regenwurmpopulation nach dem Bodeneinbau sind vermutlich mehrere Faktoren verantwortlich:

- Tiefes Vergraben der Regenwürmer bei gleichzeitigem Verdichten des Bodens
- Verletzungen der Regenwürmer beim Aus- und Einbau des Bodens. 65 % der Regenwürmer waren nach der Umlagerung verletzt, so dass ein Überleben unwahrscheinlich war.
- Nahrungsmangel unmittelbar nach dem Einbau der Rekultivierungsschicht - es fehlt noch die Streu von Pflanzen.

Untersuchungen von vergleichbaren Baumaßnahmen sind aus der Literatur nicht bekannt, auch wurde kein derart gravierender Effekt der Bodenumlagerung auf die Regenwurmpopulation erwartet. Weder Zeitpunkt (frostfreier Spätherbst) noch Bodenfeuchte (mittlere Werte) waren ungünstig für Regenwürmer. Prinzipiell sind die Ergebnisse wegen der praxiskonformen Durchführung des Testfeldbaues auch auf ähnliche Baumaßnahmen übertragbar. Deshalb sollte zukünftig der Frage nachgegangen werden, ob Bodenumlagerungen stets mit solchen katastrophalen Auswirkungen für Regenwurmpopulationen verbunden sind.

Eine Reduktion der Regenwurmverluste durch schonenderen Bodeneinbau ist in der derzeitigen Baupraxis nur schwer zu erreichen. Vermutlich ist deshalb das gezielte Einbringen von regenwurmreichem Boden nach Abschluss einer Baumaßnahme erfolgversprechender.

Entwicklung der Regenwurmpopulation vor dem Einbringen von Regenwürmern

Im Herbst 2001 wurde im U-Feld ein einziger (1 g/m² Biomasse) und im darauf folgenden Frühjahr 2002 wurden nur drei Regenwürmer (2 g/m² Biomasse) erfasst (Abbildung 11). Dieser leichte Anstieg kann aber nicht als Zeichen einer Populationsentwicklung gewertet werden, da die Probefläche von jeweils 0,75 m² viel zu klein ist, um einen solchen Unterschied abzusichern. Im K-Feld wurden jeweils keine Regenwürmer gefunden.

Die Regenwurmbiomasse der Versuchsfelder gehört damit zu den niedrigsten in Baden-Württemberg (EHRMANN et al. 2002). Da Regenwürmer einen wesentlichen Einfluss auf Streuabbau, Nährstoffmineralisierung und Bodenstruktur haben, bedeutet ihr weitgehendes Fehlen eine wesentliche Beeinträchtigung des Systems „Boden" und seiner natürlichen Entwicklungspotentiale. Da nur mit einer langsamen Zuwanderung von außen zu rechnen war - nach MARINISSEN & VAN DEN BOSCH (1992) liegt sie bei weniger als 10 m/Jahr – wurden dann Regenwürmer gezielt mittels Grassoden aus einer regenwurmreichen Wiese ausgesetzt. Positive Erfahrungen mit dem Aussetzen von Regenwürmern in regenwurmfreie Böden wurden beispielsweise in neuseeländischem Grünland oder in neu angelegten niederländischen Poldern gewonnen (HOOGERKAMP et al. 1983).

Entwicklung der Regenwurmpopulation nach dem Einbringen von Regenwürmern

Nach dem Einbringen von Regenwürmern im Frühjahr 2002 stiegen die Regenwurmbiomassen im U-Feld von 2 auf 45 g/m² und im K-Feld von 0 auf 5 g/m² an (Abbildung 11). Dies lässt sich nicht mit einer Vermehrung der schon auf der Fläche vorhandenen Regenwürmer erklären: Zum einen ist die Zuwachsrate höher als alle dem Autor aus anderen Untersuchungen bekannten, zum anderen wurde eine vorher nicht auf der Fläche gefundene Regenwurmart eingebracht und später wieder gefunden. Das Einbringen von Regenwürmern war also erfolgreich.

Die extreme Trockenheit im Sommer 2003 war für die Regenwürmer auf den Versuchsfeldern schädlich und führte zu einem Rückgang der Regenwurmbiomasse. Dabei gab es jedoch deutliche Unterschiede: Im U-Feld war der Rückgang relativ gering (minus 25 %), im K-Feld hingegen drastisch (minus 80 %). Der unverdichtete Einbau ermöglicht also eher das Überleben von Regenwürmern in Trockenjahren.

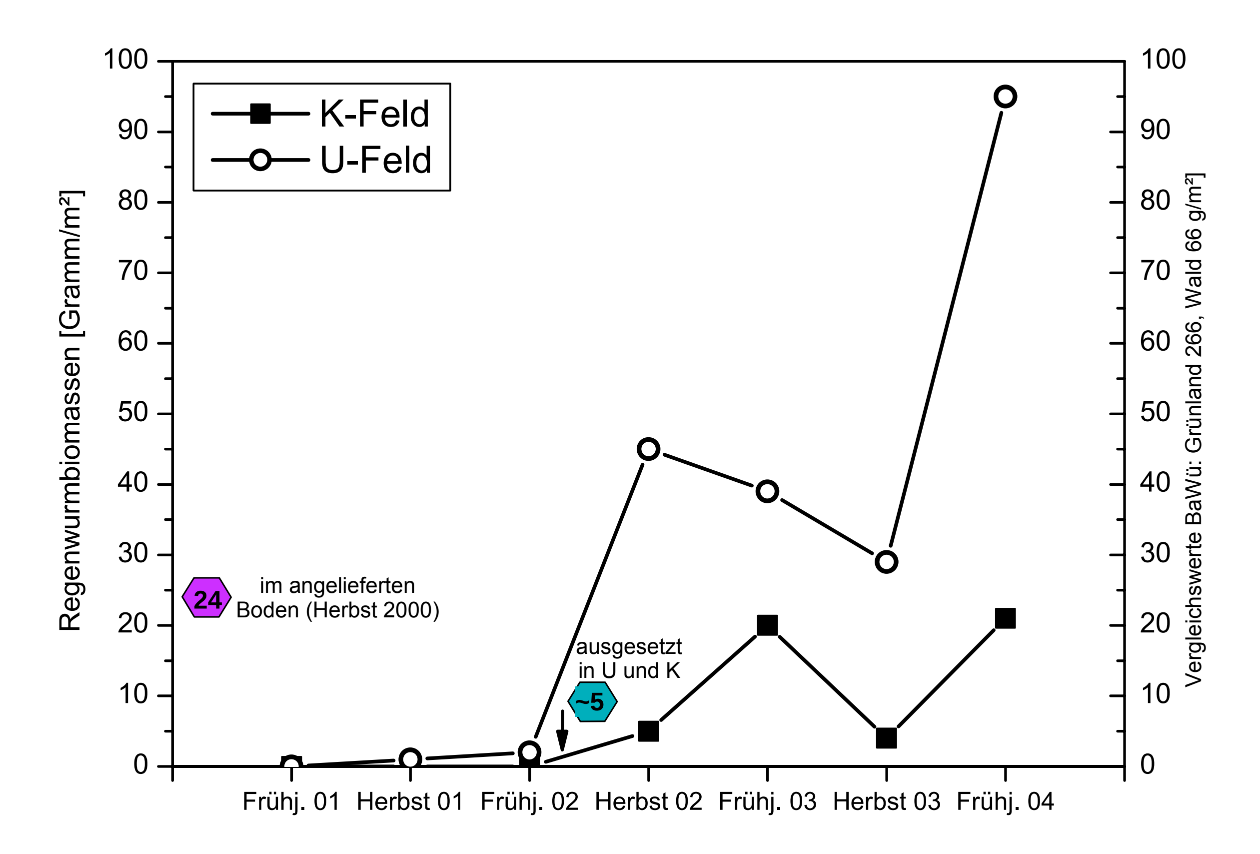


Abbildung 11: Entwicklung der Biomasse der Regenwurmpopulation im K- und U-Feld von Frühjahr 2001 bis Herbst 2003. Die im Frühjahr 2002 eingebrachten Regenwürmer können nur ungefähr als Biomasse je Fläche angegeben werden, da sich die Populationsdichte durch Wanderung ändert.

5 Schlussfolgerungen/Ausblick

Durch die Umlagerung wurde das ursprüngliche Bodengefüge zerstört. Die rekultivierten Böden sind hohlraumärmer und haben daher ein ungünstigeres Gefüge als "normale" Böden aus dem gleichen Substrat. Im K-Feld wurde der Boden zusätzlich in erheblichem Maße verdichtet. Dies schränkt die Durchwurzelbarkeit zusätzlich ein.

Das Bodengefüge muss sich erst wieder im Laufe der Jahre regenerieren. Dabei spielen verschiedene Prozesse eine Rolle. Abiotische Prozesse wie Quellen und Schrumpfen und Frost wirken von Anfang an und auch schnell (Tabelle 2). Die dabei entstehenden Strukturen sind aber nicht sehr dauerhaft und auf den Oberboden beschränkt. Wesentlich nachhaltiger sind die von Organismen (vor allem von Regenwürmer und Wurzeln) gebildeten Strukturen. Dadurch kann auch im Unterboden die Bodenstruktur verbessert werden. Diese biologische Gefügebildung braucht Zeit, sie kann aber durch eine sachgerechte Rekultivierung unterstützt werden. Daher ist - wann immer möglich - der lockere Bodeneinbau dem lagenweise verdichteten vorzuziehen.

Tabelle 2: Lockernde und verdichtende Prozesse in Böden von Deponien

	Geschwindigkeit	**Tiefe**	**Dauerhaftigkeit**
a) abiotische Prozesse			
Sackung	schnell: wenige Jahre	gesamte Rekuschicht	hoch
Risse durch Frost	schnell: < 1 Jahr	0-20 cm	gering
Risse durch Quellen und Schrumpfen	schnell: < 1 Jahr	0-50 cm?	gering
b) biotische Prozesse			
Röhren von Wurzeln	langsam: 5->50* Jahre	viele: 0-20 einige 20-100 cm	mittel
Röhren von Regenwürmern	langsam: 5->50* Jahre	viele: 0-20 einige 20-100 cm	hoch

6 Literatur

DUNGER, W. (1983): Tiere im Boden, Die Neue Brehm Bücherei 327, Wittenberg

EHRMANN, O. & BABEL, U. (1991): Quantitative Regenwurmerfassung - ein Methodenvergleich, Mitteilungen Dt. Bodenkundl. Gesellsch. 66, I: 475 - 478

EHRMANN, O., SOMMER, M. UND T. VOLLMER (2002): Regenwürmer in Wäldern Baden-Württembergs: In: SOMMER, M., EHRMANN, O., FRIEDEL, J.K., MARTIN, K., VOLLMER, T. UND G. TURIAN: Böden als Lebensraum für Organismen – Regenwümer, Gehäuselandschnecken und Bodenmikroorganismen in Wäldern Baden-Württembergs. Hohenheimer Bodenkundliche Hefte 63, Institut für Bodenkunde und Standortslehre, Universität Hohenheim, Stuttgart.

FRÜND, H.-C., E. EGBERT & G. DUMBECK (2004): Spatial distribution of earthworms (Lumbricidae) in recultivated soils of the Rhenish lignite-mining area, Germany, J. Plant Nutr. Soil Sci. 167: 494 - 502

HOOGERKAMP, M. H. ROOGAR & H.J. EIJSACKERS (1983): Effect of earthworms on grassland on recently reclaimed polder soils in the Netherlands. In: Satchell, J. E. [Hrsg.]: Earthworm Ecology, London, 85 - 105.

THIELEMANN, U. (1986): Elektrischer Regenwurmfang mit der Oktett-Methode. Pedobiologia 29: 296 - 302

Der Wasserhaushalt von Rekultivierungsschichten: Ergebnisse von Messungen und Modellierungen

Peter Wattendorf, Institut für Landespflege, Universität Freiburg

Inhalt

1 Einleitung

Wozu Wasserhaushaltsbetrachtungen von Rekultivierungsschichten?

Die Rekultivierungsschicht ist eine wichtige Komponente im Oberflächenabdichtungssystem von Deponien, denn sie dient nicht nur als Tragschicht von Bewuchs, sondern soll unter anderem als „Wasserhaushaltsschicht“ Sickerwasserflüsse reduzieren und vergleichmäßigen. Sie dient der nachhaltigen Umweltvorsorge, denn im Gegensatz zu technischen Dichtungselementen bleibt ihre Funktion auf unbegrenzte Zeit erhalten. Eine optimierte Rekultivierungsschicht als einziges „Dichtungs“-Element könnte zwar nur in niederschlagsarmen Gebieten die Absickerung von Niederschlagswasser praktisch vollständig verhindern, sie reduziert die Absickerungsraten jedoch an fast allen Standorten deutlich. Diese Erkenntnisse sind inzwischen allgemein anerkannt.

Der Wirkungsgrad der Wasserhaushaltsschicht ist neben dem Klima von den Eigenschaften des Bodens und der Vegetationsdecke abhängig. Der Substratqualität, dem Bodeneinbau, der Bepflanzung und Vegetationssteuerung kommt somit eine große Bedeutung zu (z.B. BRAUNS et al. 1997, BÖNECKE 2001). Um möglichst viel Wasser zu verdunsten, ist ein standortgerecht aufgebauter Bewuchs, meist Wald, erforderlich, der den Boden intensiv durchwurzelt und Bodenwasser auch aus größerer Tiefe aufnehmen kann.

Hierzu muss die Rekultivierungsschicht besonderen Anforderungen genügen, insbesondere müssen die Substrate möglichst locker gelagert sein (z.B. BÖNECKE 1994). Dies ist wichtig,

weil die nutzbare Feldkapazität mit zunehmender Bodendichte geringer wird, vor allem aber werden verdichtete Böden weniger intensiv durchwurzelt. Hier setzt das Forschungsvorhaben der Leonberger Lysimeterfelder an, in dem exemplarisch die Auswirkungen der Bodenverdichtung auf den Wasserhaushalt untersucht werden.

Niederschlag, Temperatur und Strahlungsenergie beeinflussen den Wasserhaushalt von Rekultivierungsschichten. Die Jahre 2002 und 2003 waren durch ausgiebige Sommerregen mit anschließenden Überschwemmungen im einen und eine „Jahrhundert-Trockenheit" im folgenden Jahr gekennzeichnet. Die beiden Jahre bieten deshalb eine gute Gelegenheit, die Auswirkungen des Klimas auf den Wasserhaushalt der Rekultivierungsschichten zu untersuchen. Interessant sind einerseits die Absickerungsmengen und -raten aus der Rekultivierungsschicht, andererseits die Bodenwassergehalte, die Auskunft über den Status der Wasserversorgung des Pflanzenbestandes geben können.

2 Methoden

2.1 Versuchsanlage und Messeinrichtungen

Die Versuchsanlage „Leonberger Lysimeterfelder" besteht im Wesentlichen aus zwei Großlysimetern mit jeweils circa 360 m² Fläche, in die im Herbst 2000 die Varianten „unverdichtet eingebaute Rekultivierungsschicht" (Feld U) und „konventionell verdichtete Rekultivierungsschicht" (Feld K) eingebaut wurden. Der konventionell eingebaute Boden wurde in drei Lagen mit einer Raupe hangabwärts eingeschoben und jeweils mit Schaffußwalze auf circa 0,95 ρ_{Pr} verdichtet. Der unverdichtete Einbau wurde ebenfalls Vor-Kopf mit einer leichten Raupe, jedoch in einem Zug und ohne Zwischenverdichtung ausgeführt. Die Rekultivierungsschichten der beiden Lysimeterfelder sind im Schnitt circa 2,1 m mächtig und unterscheiden sich nur durch das Einbauverfahren; Substrate, Bodenbearbeitung und Bepflanzung sind gleich.

Die Vegetationsuntersuchungen seit Einrichtung der Testfelder belegen, dass die unverdichteten Rekultivierungsschichten ein günstigerer Pflanzenstandort sind. Dies spiegelt sich in höheren Biomassen der Krautschicht, einer besseren Anwuchsleistung der gepflanzten Gehölze und vor allem in einer deutlich tiefer reichenden Durchwurzelung des Lysimeterfeldes U wider (WATTENDORF et al. 2005, siehe Beitrag EHRMANN in diesem Band).

Großlysimeter dienen dazu, Abflüsse aus dem Boden möglichst zu genau zu messen und damit Wasserhaushaltsbilanzen eines Standortes unter weit gehender Erhaltung ungestörter Wuchsbedingungen zu erstellen. In Leonberg können die Absickerung (As) aus den Rekultivierungsschichten der Lysimeterfelder U und K sowie der Oberflächenabfluss (Ao) kontinuierlich aufgezeichnet werden. Aus der Differenz zwischen dem Zufluss von Wasser aus Niederschlägen und der Abflüsse kann die tatsächliche Evapotranspiration (ETa) der Rekultivierungsschichten berechnet werden.

Von August 2001 bis März 2004 wurden alle zwei Wochen mit TDR-Sonden die Bodenwassergehalte an vier Messstellen pro Lysimeterfeld sowie an je zwei Messstellen pro Lysimeterfeld mit konventionellen Tensiometern die Bodenwasserspannungen in 25, 50, 85 und 135 cm Tiefe gemessen. Im August 2002 wurde zusätzlich ein Profil im unteren Teil des K-Feldes mit zehn TDR-Sonden zur Bestimmung des Bodenwassergehaltes bestückt. Die Sonden sind in und zwischen den Verdichtungszonen des Profils angeordnet (Einbautiefen

siehe Abbildung 6), um bei besonderen Witterungssituationen deren Wassergehalte zu messen.

Die Niederschlagsdaten für die Wasserhaushaltsbetrachtungen stammen von der DWD-Station Renningen (405 m ü. NN), die circa 3 km von der Versuchsanlage entfernt liegt. Nur für die Jahre 2004 und 2005 mussten Wetterdaten der circa 12 km östlich der Deponie liegenden DWD-Station Stuttgart-Echterdingen (371 m ü. NN) herangezogen werden.

2.2 Wasserhaushaltsmodellierung

Wasserhaushaltsmodellierungen von Deponie-Oberflächenabdichtungen mit Hilfe von Computer-Modellen dienen unter anderem dem Vergleich von Aufbauvarianten oder der Optimierung von Dichtungssystemen. Zur Wasserhaushaltssimulation von Deponie-Oberflächenabdichtungen wird heute meist das im Auftrag der US-EPA entwickelte Programm HELP verwendet. Es liegt aktuell in der überarbeiteten und an deutsche Verhältnisse angepassten Version 3.80D vor (SCHROEDER & BERGER 2004). Auch das Programm BOWAHALD ist in Deutschland weit verbreitet. Es wurde speziell für Wasserhaushaltsberechnungen von Bergehalden entwickelt, kann jedoch auch für Deponie-Oberflächenabdeckungen eingesetzt werden (DUNGER 2001).

Wasserhaushaltsmodellierungen benötigen ausreichend lange Betrachtungszeiträume, um möglichst die ganze Bandbreite der Variationen des Klimas zu erfassen. Die Modellierungen des Wasserhaushalts der Leonberger Lysimeterfelder wurden mit Klimadaten der DWD-Stationen Renningen (Niederschlag) und Böblingen (Temperatur, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung) für den Zeitraum 1992 bis 2003 gerechnet. Im folgenden Beitrag wird jedoch nicht auf den Vergleich der Wasserhaushaltsmodelle über diesen 11-Jahres-Zeitraum eingegangen (siehe hierzu WATTENDORF et al. 2005), sondern es werden nur die Modellierungsergebnisse der Jahre 2001 bis 2003 den Messergebnissen aus den Lysimeterfeldern gegenüber gestellt.

Tabelle 1: Bodendaten der Rekultivierungsschicht in den Leonberger Lysimeterfeldern

Lysimeterfeld	**U**	**K**	
Bodenart	Ut2/Ut3		
Steingehalt	< 1		[%]
Trockenraumdichte Oberboden	1,3		[g/cm^3]
Trockenraumdichte Unterboden	1,57 - 1,65	1,57 - 1,69	[g/cm^3]
Feldkapazität	35,3 – 35,9	34 – 35,5	[Vol-%]
Totwasseranteil *	12		[Vol-%]
Durchwurzelungstiefe (≥ Stufe 2**)	65	35	[cm]
*: empirischer Wert aus AG BODEN (1994); **: Einstufung gemäß AG BODEN (1994)			

Der Wasserhaushalt der Leonberger Lysimeterfelder wurde mit realen Boden- und Vegetationsdaten aus den vorangegangenen Untersuchungen berechnet. Werte für Parameter, die in den Versuchsfeldern mit vertretbarem Aufwand nicht bestimmt werden konnten, beispielsweise die Wasserleitfähigkeit und der Permanente Welkepunkt (Totwasseranteil),

wurden aus der empirischen Datensammlung in AG BODEN (1994) übernommen. Die wichtigsten Eingangsdaten für die Modellierung der Versuchsfelder sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Ein Problem bestand darin, die Schichtung des Bodens im K-Feld, die sich vor allem anhand des Eindringwiderstandes und nur bedingt über die Trockenraumdichte nachweisen lässt (Tabelle 1), adäquat in Eingangsdaten der Modelle umzusetzen. Dies war im Prinzip nur über die deutlich geringere Durchwurzelungstiefe im K-Feld möglich.

Die Eigenschaften des Bewuchses werden von HELP über den Blattflächenindex (LAI) definiert. BOWAHALD sieht im Gegensatz dazu eine Reihe von Nutzungs- und Bewuchstypen (Acker, Grünland, Wälder) mit frei wählbaren Eigenschaften wie Bestandesalter oder -aufbau vor. Der auf den Versuchsfeldern vorhandene Bewuchs kann mit den Programmen ohne Einschränkungen modelliert werden, da die im Herbst 2000 und Frühling 2001 gepflanzten Gehölze bezüglich ihrer Wirkung auf den Wasserhaushalt noch hinter den Gräsern zurückstehen. Der dichten Vegetationsdecke aus dominierenden Gräsern, vereinzelten Kräutern und Gehölzjungwuchs wurde ein LAI von 4 („guter Grasbewuchs“) beziehungsweise bei BOWAHALD der Nutzungstyp „Grünland“ zugeordnet.

3 Vergleich der Testfelder: Messergebnisse

3.1 Oberflächenabfluss

Die Entstehung von Oberflächenabfluss hängt von der Hangneigung, den Bodeneigenschaften und der Vegetationsdecke ab. Eine raue Oberfläche und ein dichter Bewuchs tragen dazu bei, Oberflächenabflüsse niedrig zu halten oder sogar ganz zu verhindern. Im Gegensatz dazu setzt das Einebnen, Befahren oder Walzen die Infiltrationskapazität der Oberfläche stark herab. Hierdurch wird nicht nur der Oberflächenabfluss, sondern auch die Bodenerosion gefördert. Beim Einbau der Rekultivierungsschichten in Leonberg wurde der Oberboden beider Testfelder mit dem Bagger aufgelockert. Es entstand eine sehr raue Oberfläche mit einer hohen Infiltrationskapazität. So konnte allein die raue Bodenoberfläche der im Winter 2000/01 noch weitgehend unbegrünten Rekultivierungsschicht Oberflächenabfluss und Erosion verhindern. Da Oberboden und Bewuchs der Lysimeterfelder gleich gestaltet sind, ist auch beim Oberflächenabfluss kein Unterschied zu erkennen.

Im Allgemeinen wird der Oberflächenabfluss von Deponieböschungen stark überschätzt. Hat sich erst ein dichter Bewuchs etabliert und ist der Oberboden durch Gefüge- und Humusbildung und biologische Aktivität gelockert, so wird die Fließgeschwindigkeit des Wassers vermindert und es infiltriert in den Boden. Auch in Leonberg fließt trotz der relativ steilen Böschung mit einer Neigung bis 1: 2,7 praktisch kein Wasser an der Oberfläche aus den Lysimeterfeldern ab. Bisher wurde nur bei einem Gewitter mit 59,6 mm Niederschlag am 27. Juni 2001 Oberflächenabfluss registriert. Im Verlauf dieses Ereignisses verstopfte sich die noch im Probebetrieb laufende Messanlage, so dass keine Aussagen zur Höhe des Oberflächenabflusses möglich sind. Seit diesem Ereignis wurde in Leonberg kein Oberflächenabfluss mehr festgestellt.

3.2 Absickerung

3.2.1 Abflussverhalten der Testfelder

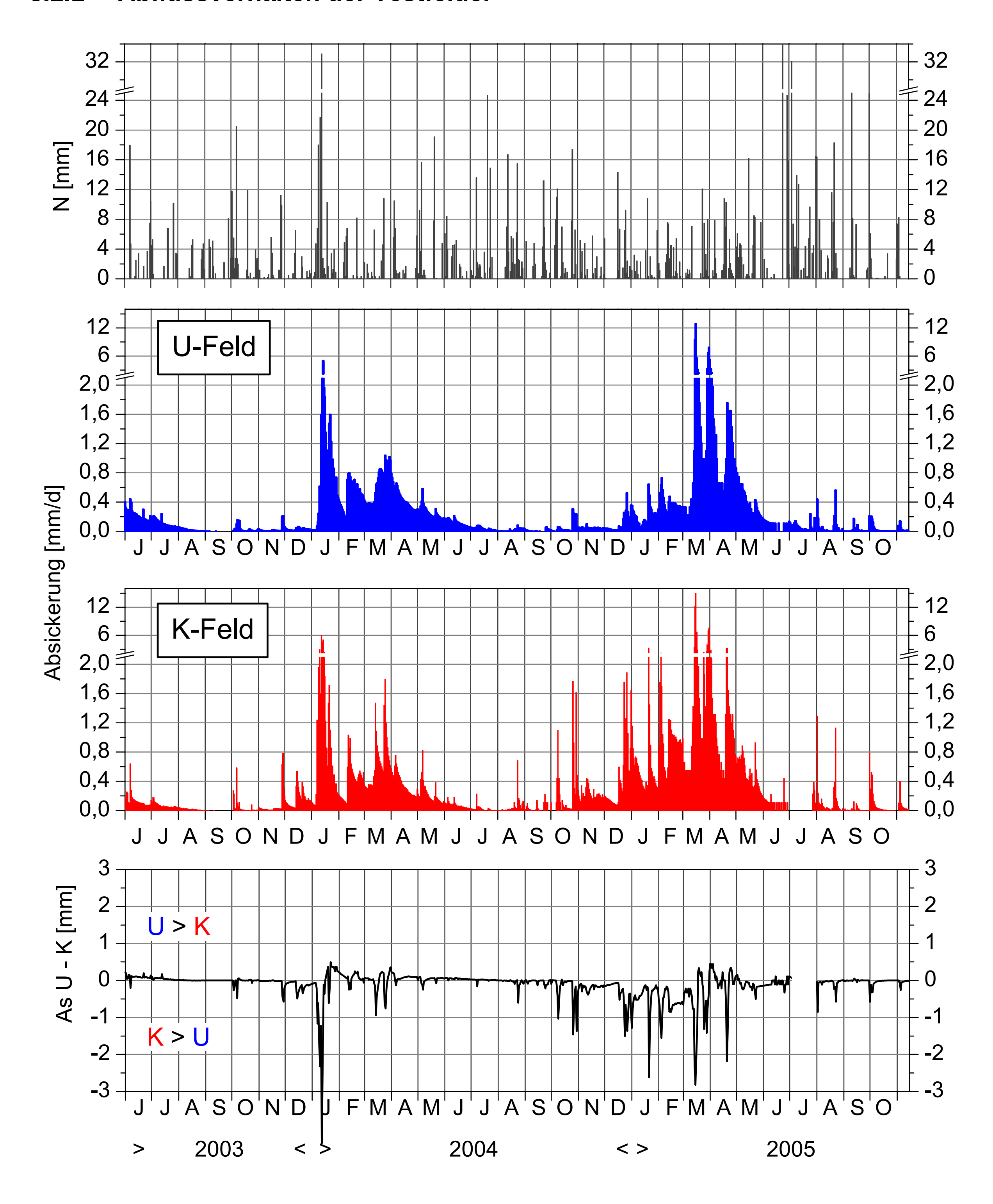


Abbildung 1: Tagessummen von Niederschlag und Absickerung aus den Lysimeterfeldern U und K sowie Differenz der täglichen Absickerungsraten (AsU - AsK) vom 1.06.2003 bis 15.11.2005; Niederschlag: DWD-Station Renningen, ab 1.1.2004 DWD-Station Stuttgart-Echterdingen; Juli 2005: keine Werte aus Lysimeterfeld K

In Abbildung 1 sind die täglichen Niederschlagsmengen sowie die Absickerungsraten der beiden Lysimeterfelder aufgetragen. Bei dieser hohen zeitlichen Auflösung zeigen sich erhebliche Unterschiede zwischen beiden Feldern:

- Es zeichnet sich eine unterschiedliche Reaktion auf Niederschläge ab. Das K-Feld reagiert mit schnellerem Ansteigen und Absinken der Abflussmenge auf Niederschläge. Während die Absickerungsraten des U-Feldes meist langsam steigen und sinken, treten im K-Feld öfter einzelne Tage mit erheblich höherer Absickerung auf.
- Das U-Feld dämpft die Abflussspitzen in der Folge von Niederschlagsereignissen stärker als das K-Feld. Dies wird besonders im Oktober und Dezember 2004 sowie im Januar und Februar 2005 deutlich. Nur im K-Feld übersteigen die Abflussmengen einzelner Tage häufig die Werte der vorangehenden oder folgenden Tage um ein Vielfaches. Zum Beispiel regnete es am 23. und 24. August 2004 insgesamt 21,7 mm, die Absickerungsrate des U-Feldes stieg in diesen beiden Tagen von 0,02 mm/d auf 0,08 mm/d, die des K-Feldes von 0,01 mm/d auf 0,68 mm/d.

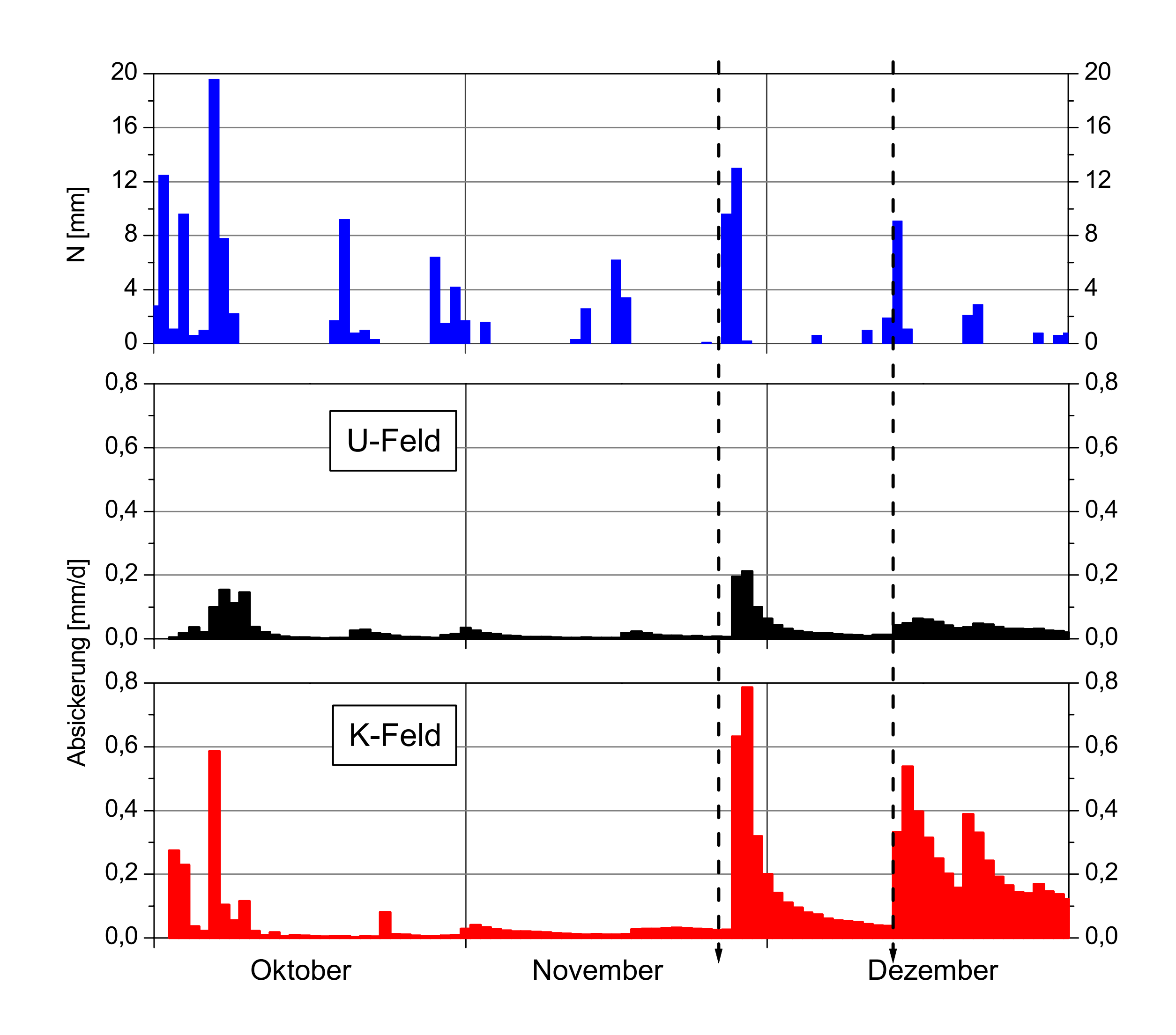


Abbildung 2: Tageswerte von Niederschlag (N) und Absickerung aus den Lysimeterfeldern U und K vom 1. Oktober bis 31. Dezember 2003

- Die maximalen täglichen Absickerungsraten der Lysimeterfelder unterscheiden sich nicht sehr deutlich; so beträgt der höchste tägliche Abfluss - gemessen am 16.03.05 - aus dem K-Feld 15,0 mm und aus dem U-Feld 12,8 mm.
- Die Kurve der Differenz zwischen Absickerung U-Feld und K-Feld (Abbildung 1, unten) macht das unterschiedliche Abflussverhalten nochmals deutlich: Die Abflüsse aus Lysimeterfeld U sind oft über längere Zeiträume geringfügig höher als die des K-Feldes (Kurve liegt im positiven Bereich), deutlich ausgeprägt beispielsweise im Juni und Juli 2003 oder März bis Juli 2004. Im Gegensatz dazu schlägt die Kurve – außer im Januar 2004 – meist nur kurzzeitig in den negativen Bereich aus, wenn die Abflüsse aus Lysimeterfeld K die des U-Feldes übersteigen.

Die starke sommerliche Austrocknung der Rekultivierungsschicht führte 2003 zum vollständigen Aussetzen der Absickerung in der Zeit vom 25. August bis zum 3. Oktober im U-Feld beziehungsweise 30. August bis 2. Oktober im K-Feld. Das Abflussverhalten bei der Wiederbefeuchtung des Bodens im Herbst 2003 kann beispielhaft die Unterschiede zwischen den Lysimeterfeldern verdeutlichen (Abbildung 2). In beiden Feldern steigt die Absickerung nach starken Niederschlägen mit einer Verzögerung von maximal einem Tag schnell an (Pfeile in Abbildung 2) und geht danach langsam wieder zurück. Im K-Feld sind jedoch, vor allem im Dezember 2003, insgesamt höhere Absickerungsmengen und vor allem deutlich höhere Spitzenabflüsse zu verzeichnen. Wahrscheinlich sind laterale Wasserflüsse in der Rekultivierungsschicht auf der Oberfläche der ersten verdichteten Schichten hierfür verantwortlich (siehe hierzu auch 3.4.2).

3.2.2 Absickerungssummen

Die Summenkurven der Absickerung beider Lysimeterfelder ab Juni 2003 sind in Abbildung 3 zusammen mit dem Niederschlag aufgetragen. Bis September 2004 zeigen sie für beide Feldern einen sehr ähnlichen Verlauf, nur kurzzeitig übersteigt die Absickerung aus dem K-Feld die des U-Feldes. Die Summenkurve des K-Feldes verläuft fast gleichmäßig um circa 10 mm über der des U-Feldes. Erst im Herbst und Winter 2004/05 versickerte im K-Feld deutlich mehr Wasser, so dass der Unterschied im April 2005 bereits circa 90 mm beträgt. An diesem Verhältnis ändert sich während des Sommers 2005 mit relativ geringen Absickerungsraten nichts mehr.

Die Gesamt-Absickerung zwischen 1. Juni 2003 und 30. Juni 2005 (25 Monate) beträgt im K-Feld 340,5 mm und im U-Feld 249,3 mm, das sind circa 26 % beziehungsweise 19 % der Niederschlagsmenge in diesem Zeitraum (1312 mm). Die Absickerung des Lysimeterfeldes U ist somit um 91,2 mm beziehungsweise 27 % niedriger als die des K-Feldes.

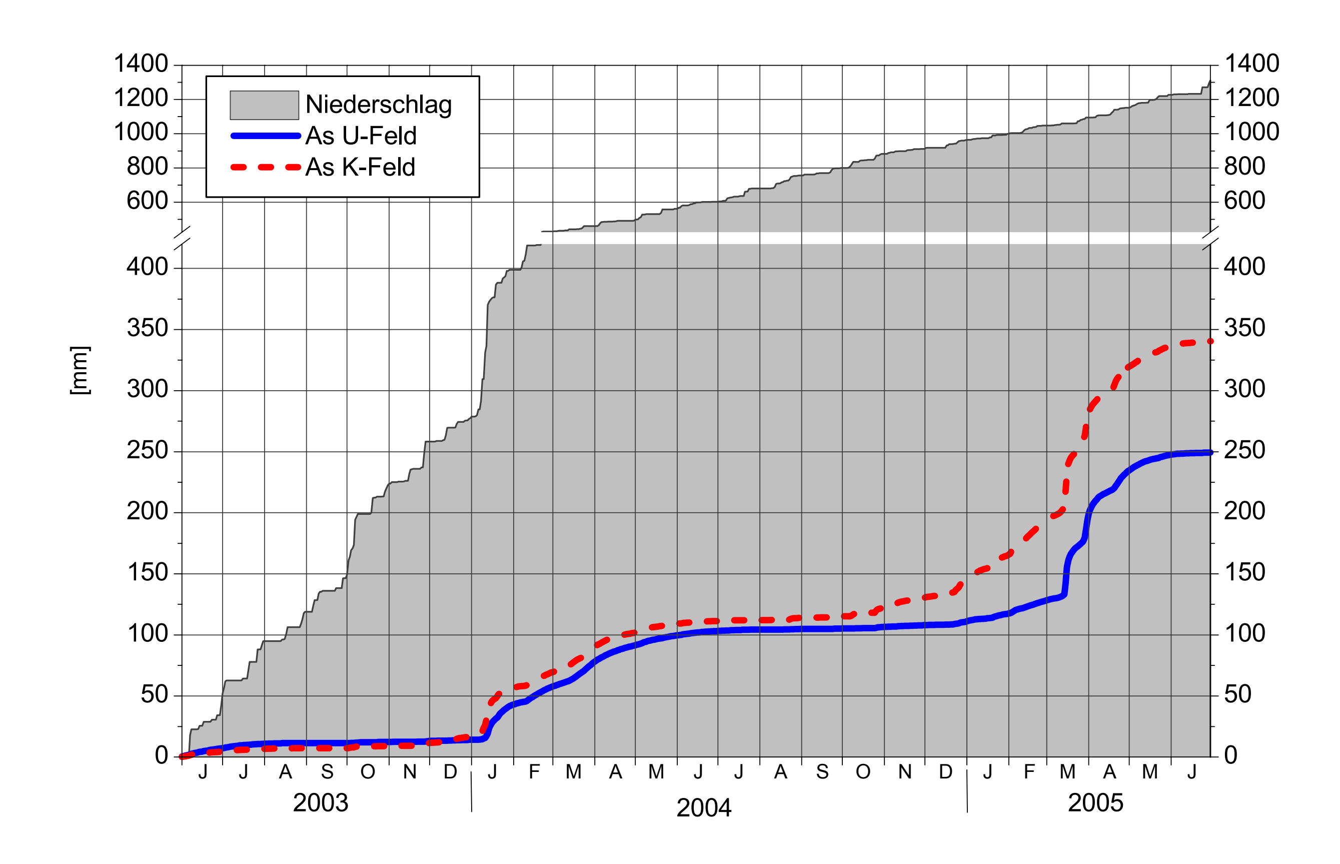


Abbildung 3: Summenkurven von Niederschlag und Absickerung aus den Lysimeterfeldern U und K vom 1.06.03 bis 30.06.05; Niederschlagsdaten DWD-Station Renningen, ab 1.01.2004 Station Stuttgart-Echterdingen

3.3 Wasserversorgung der Pflanzendecke

Die Absickerungsmenge aus der Rekultivierungsschicht hängt wesentlich von der Verdunstung ab. Dies setzt eine möglichst hohe Transpirationsleistung der Pflanzen voraus. Während der Sommermonate ist die potentielle Verdunstung am höchsten, denn die Pflanzen sind belaubt, verbrauchen viel Wasser für ihr Wachstum und die Strahlungsenergie ist hoch. Deshalb muss gerade im Sommer eine möglichst kontinuierliche Wasserversorgung gewährleistet sein, denn bei Wassermangel schränken die Pflanzen ihre Transpiration ein. Menge und Verfügbarkeit des Bodenwassers hängen bei gegebenen klimatischen Bedingungen vor allem von den Bodeneigenschaften ab.

In Abbildung 4 sind neben den Bodenwassergehalten des Wurzelraumes in 50 und 85 cm Tiefe (als Mittel von jeweils vier Messpunkten) wichtige Eckwerte des Bodenwasserhaushaltes zu sehen. Die Messstellen in 25 cm Tiefe trocknen im Sommer schnell aus und sind deshalb der Übersichtlichkeit halber nicht eingezeichnet. Die Obergrenze der Wassergehaltskurven markiert ungefähr die *Feldkapazität* (FK), sie beträgt in den Testfeldern bis circa 36 Vol-%. Der *permanente Welkepunkt* (PWP) ist die untere Grenze der Wasserverfügbarkeit für Pflanzen. Er liegt bei den Böden der Testfelder im Bereich von 12 Vol-%[3].

[3] empirische Werte für den PWP nach AG BODEN (1994): Bodenart Ut2 – Ut3, mittlere Trockenraumdichtestufe (1,45 – 1,65 g/cm³)

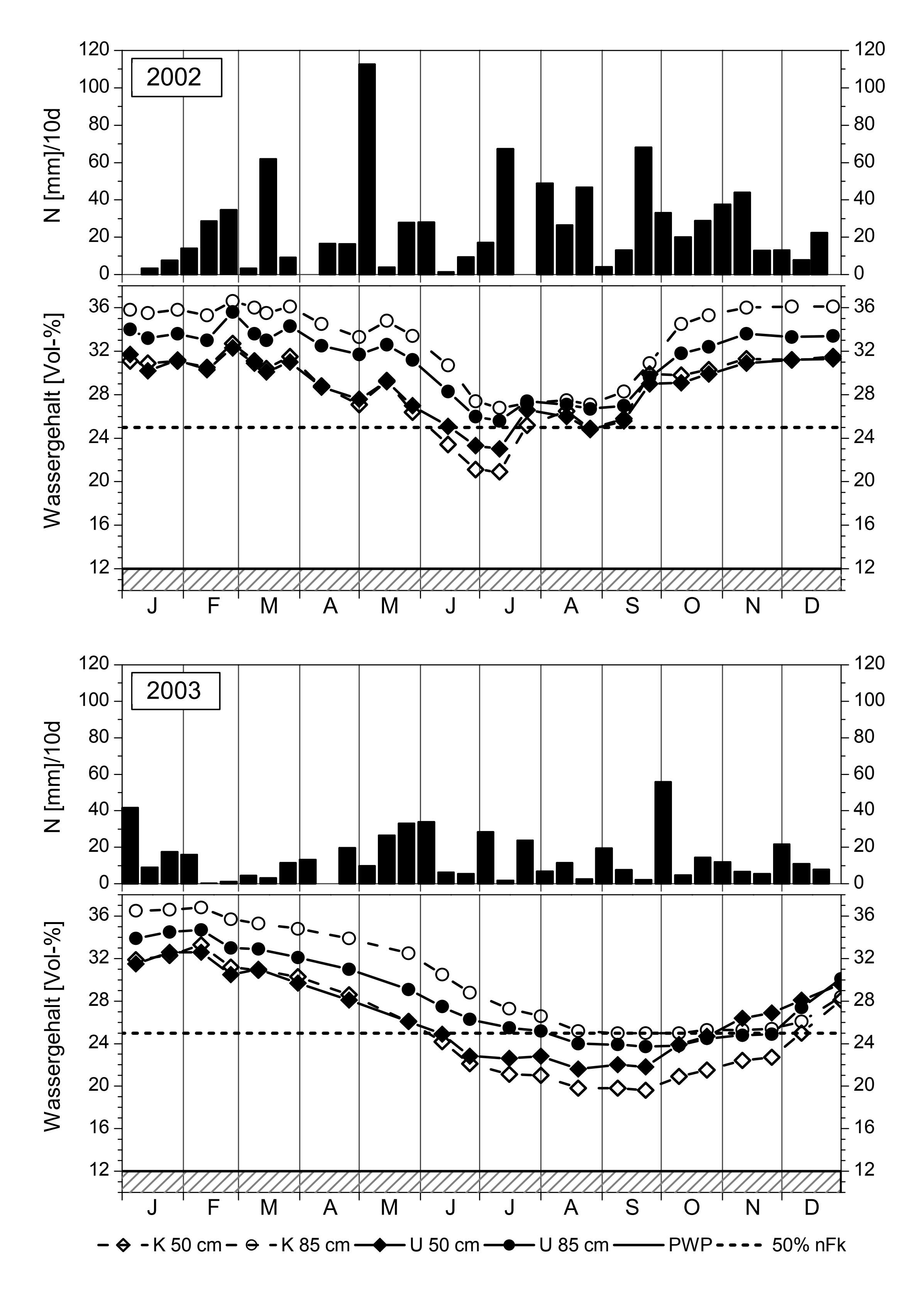


Abbildung 4: Niederschlag (10-Tages-Summen) und Bodenwassergehalte in 50 und 85 cm Tiefe im K- und U-Feld 2002 (oben) und 2003 (unten), PWP = permanenter Welkepunkt, 50 % nFK = Wassergehalt von 50 % der nutzbaren Feldkapazität

Aus der Differenz dieser Werte berechnet sich die *nutzbare Feldkapazität* (nFk), die in den Testfeldern demnach bei rund 24 Vol-% liegt. Der Wasserverbrauch von Wäldern nimmt bereits ab, wenn der Bodenwassergehalt unter circa 50 % der nutzbaren Feldkapazität

absinkt (AKS 1996). Bei dieser Grenze beginnen Bäume ihre Transpiration einzuschränken, um drohendem Wassermangel zu entgehen. Sie ist in Abbildung 4 als 50 % nFK markiert.

Die Niederschlagsverteilung in Leonberg ist im langjährigen Mittel (1961-1990) relativ günstig: Circa 57 % „Sommerniederschlag“ in der Zeit von Mai bis Oktober stehen 43 % „Winterniederschlag“ in der Zeit von November bis April gegenüber, so dass der Bodenwasserspeicher auch im Sommer immer wieder teilweise aufgefüllt werden kann. Dies gilt für die Jahre 2001 und 2002, nicht jedoch für 2003.

Im niederschlagsreichen Jahr 2002 liegen die Wassergehalte im Unterboden meist im Bereich der Feldkapazität. Sie sinken nur zwischen Anfang Juni und Mitte September in den Bereich der Wassersättigung bis 50 % der nutzbaren Feldkapazität ab. Unterschritten wird die 50 %-nFK-Marke in beiden Lysimeterfeldern hierbei nur in 50 cm Tiefe. Der Boden im K-Feld trocknet hierbei allerdings stärker und vor allem länger aus als im U-Feld (ca. 50 Tage gegenüber 33 Tagen). Die Unterböden unterhalb 85 cm Tiefe sind in beiden Feldern stets ausreichend mit Wasser versorgt.

Auch das Trockenjahr 2003 (Abbildung 4, unten) beginnt mit Bodenwassergehalten im Bereich der Sättigung, die bereits ab Ende Februar kontinuierlich zurückgehen. Ebenso wie im Vorjahr unterschreiten die Wassergehalte in 50 cm Tiefe Anfang Juni (K-Feld) bzw. Mitte Juni (U-Feld) die 50 %-nFK-Marke. Allerdings hält im Trockenjahr 2003 dieser Zustand länger an und die Unterschiede zwischen den Lysimeterfeldern sind deutlicher: Bereits ab Mitte Oktober ist der Unterboden im U-Feld wieder ausreichend (Wassergehalt > 25 Vol-%) mit Wasser versorgt, im K-Feld ist er dies erst ab Mitte Dezember.

Weiter fällt auf, dass die Wiederbefeuchtung im K-Feld in 50 cm Tiefe sehr viel länger dauert als im U-Feld, dies kann ebenso wie das stärkere Austrocknen mit der Schichtung des Testfeldes begründet werden: Bei Wiederbefeuchten fließt ein Teil des eindringenden Regenwasser auf der obersten Verdichtungsschicht lateral ab, ohne den Unterboden zu erreichen (siehe folgendes Kapitel).

Die Wassergehalte der Messstellen in 85 cm Tiefe sinken in beiden Lysimeterfeldern auch im Trockenjahr 2003 nur geringfügig unter die 50 %-nFK-Marke. Insgesamt sind die Wasserdefizite nach dem „Jahrhundertsommer“ ausgeprägter; bis Jahresende 2003 wird an keiner Stelle die Wassersättigung bis zur Feldkapazität erreicht. Weiterhin ist charakteristisch, dass die Differenz der Wassergehalte zwischen 50 und 85 cm Bodentiefe im K-Feld meist viel größer als im U-Feld ist. Auch dies erklärt sich durch die unterschiedliche Bodendichte und den Einfluss der Verdichtungszonen auf den Wasserfluss in der Rekultivierungsschicht des K-Feldes.

3.4 Wirkung des Einbauverfahrens auf den Wasserhaushalt

3.4.1 Bildung von Stauwasser

Besondere Beachtung verdienen Zeiten mit sehr niedrigen oder negativen Werten der Wasserspannung. Die Wasserspannungskurven der Unterböden beider Lysimeterfelder sind deshalb in Abbildung 5 als Mittelwerte der beiden Messstellen für die Tiefenstufen 135 und 185 cm separat dargestellt. Hier tritt ein wesentlicher Unterschied im Wasserhaushalt der beiden Versuchsfelder deutlich zu Tage: Bei hohen Bodenwassergehalten, wie sie im Winter

2001/02, von Ende Oktober 2002 bis Mai 2003 sowie kurzfristig im April 2004 gemessen wurden, zeigen die Tensiometer aller Messstellen des K-Feldes in 135 und 185 cm Tiefe durchgehend Bodenwasserspannungen < 0 hPa[4] an. Kurzfristig können dann auch die Wasserspannungen in 85 cm Tiefe unter 0 hPa absinken. Im Gegensatz dazu unterschreiten die Wasserspannungswerte in den Messstellen des U-Feldes in 135 und 185 cm Tiefe nur an jeweils einem Termin geringfügig die 0-hPa-Grenze[5] und steigen danach sofort wieder an.

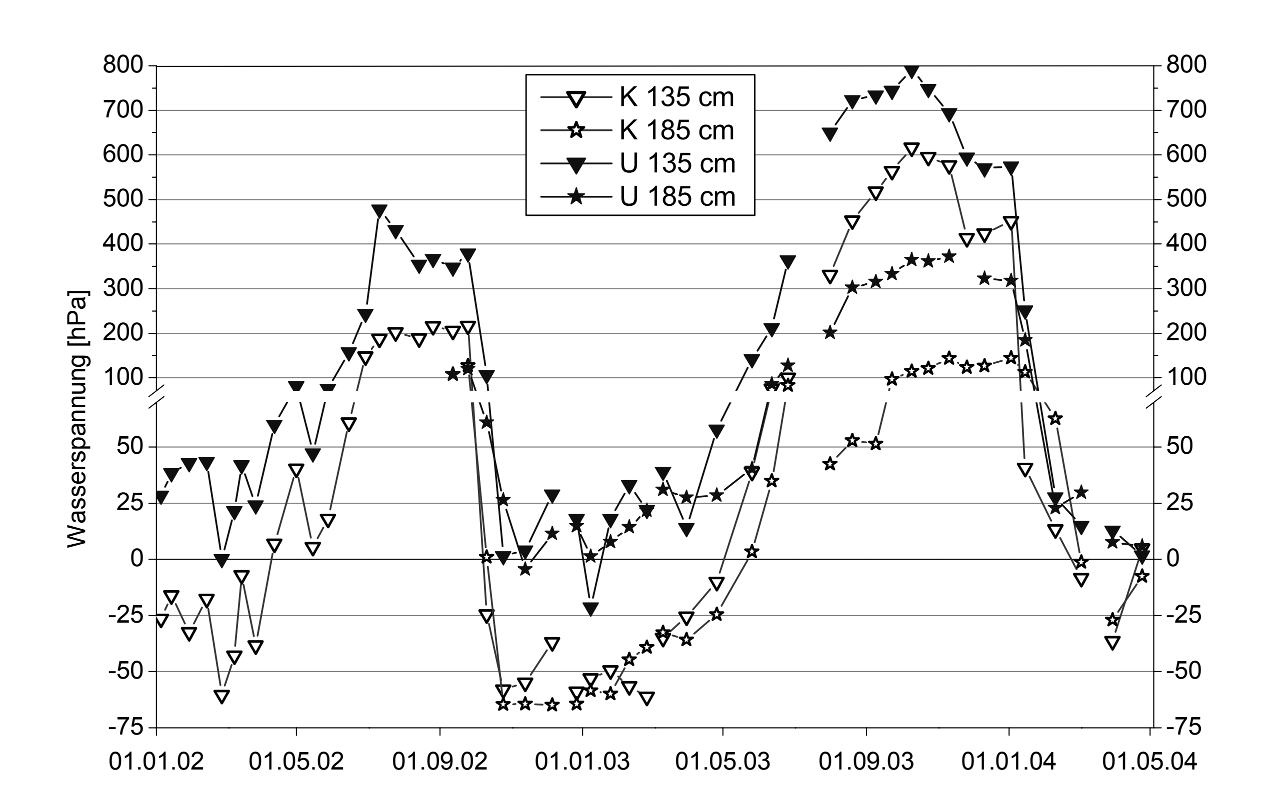


Abbildung 5: Bodenwasserspannung im Unterboden der Versuchsfelder; Mittelwerte aus jeweils zwei Messstellen

Bei negativen Matrixpotentialen wirkt auf das Tensiometer ein Druck, den eine über der Messtiefe aufgebaute Wassersäule verursacht. Theoretisch entspricht dabei 1 hPa 1 cm Wassersäule. Die in Testfeld K in den Herbst- und Wintermonaten gemessenen negativen Wasserspannungen im Unterboden belegen, dass sich zu Zeiten hoher Wassersättigung Stauwasser auf den verdichteten Lagen der Rekultivierungsschicht ausgebildet hat. Zeitweise wirkt dieser Stauwassereinfluss in abgeschwächter Form bis auf die in 85 cm Tiefe eingesetzten Tensiometer im K-Feld.

Die Betrachtung der einzelnen Messstellen am Ober- und Unterhang des K-Feldes zeigt, dass die Stauwasserbildung weitgehend unabhängig von der Position am Hang ist. Somit ist davon auszugehen, dass sich zeitweise eine durchgehende Stauschicht auf der gesamten Böschungslänge ausbildet. Da sich das Stauwasser im K-Feld meist außerhalb der Vegetationszeit und überwiegend in mehr als 1 m Tiefe bildet und aufgrund der Hangneigung aus der Rekultivierungsschicht abziehen kann, ist sein Einfluss auf die Vegetation zumindest

---

4 Minimum: –58 bis -65 hPa in 185 cm Tiefe, vom 25.10. – 25.01.2003
5 Minimum: -21 hPa in 135 cm Tiefe, am 08.01.2003

vorläufig noch gering. In ebener Lage wären Wuchsschäden zu befürchten. Aus Gründen der Standsicherheit sollte Stauwasser in Rekultivierungsschichten jedoch vermieden werden.

3.4.2 Verdichtungen und Wassergehalte im K-Feld

Im August 2002 wurde ein Profil in der lagenweise verdichteten Rekultivierungsschicht des K-Feldes angelegt und mit insgesamt zehn TDR-Sonden bestückt. Diese Sonden wurden gezielt in und zwischen den Verdichtungszonen des Bodens eingebracht. Die Ergebnisse der Messungen für die zweite Jahreshälfte 2002 und 2003 sind in Abbildung 6 dargestellt.

Im feuchten Sommer 2002 (Abbildung 6, oben) weichen die Wassergehalte im Tiefenprofil nur um wenige Volumen-Prozent voneinander ab. Charakteristisch für das Profil im K-Feld sind geringfügig höhere Wassergehalte in den am stärksten verdichteten Zonen (in Abbildung 6 grau unterlegt). Hier ist das Volumen der luftführenden weiten Grobporen reduziert, und bei starker Verdichtung der Anteil an fest gebundenem „Totwasser“ in Feinporen größer. Auch in der weniger stark verdichteten Bodenschicht unmittelbar darüber sind die Wassergehalte meist erhöht, weil das Wasser nur langsam versickern kann. So wird im Herbst und Winter, zumindest in 91 und 154 cm Tiefe, die Feldkapazität von circa 36 Vol-% überschritten. Dieser Wasserüberschuss kann aber nur langsam lateral abgeführt werden. Wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben wurde, sind zeitweise staunasse Bedingungen die Folge.

Der anhaltend trockene Sommer 2003 (Abbildung 6, unten) lässt die unterschiedlichen Eigenschaften der Schichten im Profil deutlicher zu Tage treten. Bis in circa 1 m Tiefe sind die höchsten Wassergehalte in und unmittelbar über den Verdichtungszonen vorhanden. Der Bereich zwischen den beiden oberen Verdichtungszonen ist in 64 und 78 cm Tiefe stark, das heißt fast bis zum Permanenten Welkepunkt, ausgetrocknet. Hier haben die Pflanzen bereits im August das meiste Wasser verdunstet, es steht ihnen nur noch wenig Wasser zur Verfügung. Bei Wiederbefeuchtung ab Oktober ändert sich dies bis Ende Dezember nur sehr langsam. Die Wassergehalte steigen vor allem im Bereich in und über der ersten Verdichtungszone an. Der unterhalb der obersten Verdichtungszone liegende Boden wird nur sehr langsam wieder mit Wasser gesättigt. Das Verhalten des K-Feldes - deutliche Absickerung vor Aufsättigung des gesamten Bodenwasserspeichers – (siehe 3.2.1) legt die Vermutung nahe, dass hier bereits auf der Sohle der ersten Verdichtungsschicht Wasser lateral aus der Rekultivierungsschicht abgeführt wird.

3.5 Fazit

- Der lagenweise Bodeneinbau im K-Feld führt zu Schichten unterschiedlicher Wassersättigung. Vor allem im Winter entsteht auf den dichten Schichten Stauwasser. Im Hinblick auf die Standsicherheit der Rekultivierungsschicht sollte dies vermieden werden. Verdichteter Einbau kann sich somit bei Bodenarten mit niedriger Wasserleitfähigkeit auch ungünstig auf die Standsicherheit auswirken.
- Die Wasserversorgung der Pflanzen ist im K-Feld offensichtlich schlechter als im U-Feld. Dies lässt sich einerseits aus den niedrigeren Bodenwassergehalten in 50 cm Tiefe erkennen, andererseits an der Tatsache, dass das K-Feld in der Tiefe schlechter durchwurzelbar ist.

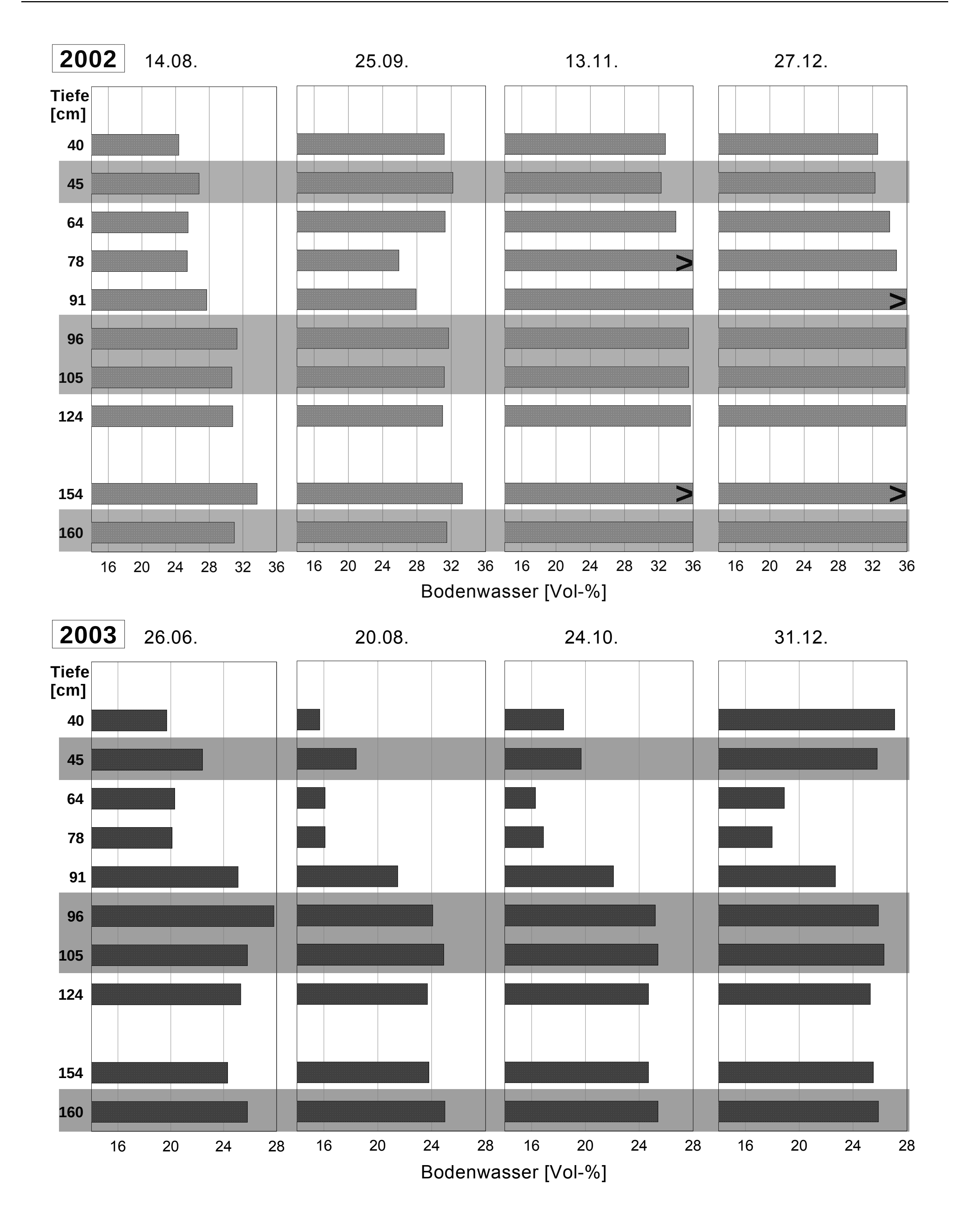


Abbildung 6: Bodenwassergehalte [Vol-%] in einem hoch auflösenden Messprofil in Testfeld K; grau unterlegt = Haupt-Verdichtungszonen, > = WG > Feldkapazität (36 Vol-%)

- Die optimierte Rekultivierungsschicht kann - zumindest beim derzeitigen Bewuchs aus Gras und jungen Bäumen - auch in einem extremen Trockenjahr wie 2003 die Wasserversorgung der Pflanzen sicher stellen.

- Der Unterboden trocknete auch 2003 in keinem der Felder aus. Bis auf wenige Wochen (25.8. bis 2.10.03) war selbst im „Jahrhundertsommer“ 2003 eine stetige geringe Absickerung zu verzeichnen. Dies ist im Hinblick auf die Schutzfunktion der Rekultivierungsschicht für mineralische Abdichtungen wünschenswert.
- Es wurde nur einmalig im Sommer 2001 Oberflächenabfluss registriert.
- Es sind qualitative und quantitative Unterschiede im Absickerungsverhalten der Lysimeterfelder seit Juni 2003 zu erkennen. Die Absickerungsmenge des K-Feldes lag um circa 27 % über der des U-Feldes.
- Das U-Feld dämpft die Abflussspitzen in der Folge von Niederschlägen stärker und liefert meist kontinuierlichere Abflussraten als das K-Feld. Die Dränabflüsse aus dem K-Feld steigen nach Niederschlagsereignissen meist schneller und höher an und sinken schnell wieder ab. Grund hierfür ist vermutlich eine Wasserbewegung auf den verdichteten Schichtoberflächen. Diese führt dazu, dass im K-Feld bereits Wasser versickert, bevor der Bodenwasserspeicher gleichmäßig aufgefüllt ist.
- Trotz der Unterschiede in der Vegetationsentwicklung zwischen den Lysimeterfeldern ist davon auszugehen, dass die daraus resultierende unterschiedliche Verdunstung zurzeit noch einen geringeren Einfluss auf den Wasserhaushalt der Testfelder hat als die oben beschriebenen Prozesse.

4 Wasserhaushaltsmodellierung

4.1 Klima in Leonberg

Leonberg ist mit einem langjährigen Mittel (1961 - 1990) der Jahresniederschläge von 764 mm und einer Jahresdurchschnittstemperatur von 10,6 °C den wärmeren Regionen Deutschlands zuzuordnen. In den Jahren 2001 (874,8 mm) und 2002 (889,0 mm) fiel deutlich mehr Niederschlag als im langjährigen Mittel. Wie bereits erwähnt, war 2003 ein außergewöhnlich trockenes Jahr mit nur 495,2 mm. Die Verteilung der Niederschläge ist in Leonberg unabhängig von der Jahressumme recht konstant und beträgt circa 57 % von Mai bis Oktober gegenüber 43 % in der Zeit von November bis April.

4.2 Modellierungsergebnisse und Messungen der Absickerung

4.2.1 Gesamt-Absickerungsmenge des U-Feldes

Für den Zeitraum vom 1. August 2001 bis 31. Dezember 2003 berechnete HELP 509 mm Gesamt-Absickerung, BOWAHALD 424 mm. Die im U-Feld in dieser Zeit gemessene Absickerung beträgt insgesamt 626 mm. Die Abweichung der Modellierungsergebnisse von den Messungen fällt damit recht deutlich aus: HELP unterschätzt die Absickerung um 117 mm, das entspricht circa 19 % der Gesamt-Absickerung, BOWAHALD sogar um 202 mm (circa 32 %).

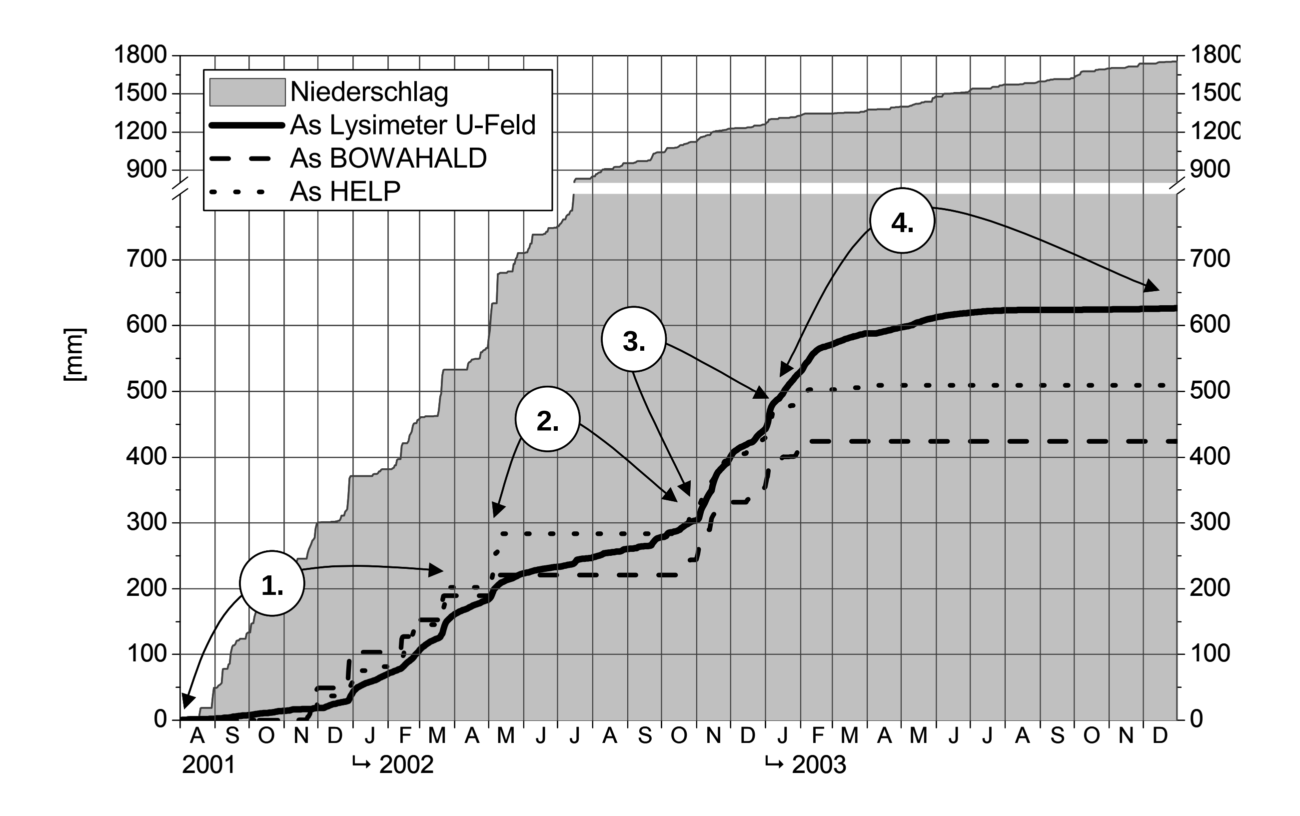


Abbildung 7: Vergleich der modellierten und gemessenen Absickerung; Summenkurven der Tageswerte vom 1. August 2001 bis 31. Dezember 2003

Abbildung 7 zeigt Summenkurven des Niederschlags, der im Lysimeterfeld U gemessenen sowie der modellierten Absickerungsmengen. Der Betrachtungszeitraum kann im Hinblick auf die Genauigkeit der Modellierungsergebnisse in vier Phasen untergliedert werden:

1. Von August 2001 bis Mai 2002 stimmen die von beiden Modelle berechneten Absickerungsmengen gut mit der realen Absickerung des U-Feldes überein.

2. Anfang Mai 2002 überschätzt HELP die Wirkung einer regenreichen Phase und berechnet 81 mm Absickerung gegenüber gemessenen 28 mm im U-Feld. Die HELP-Kurve liegt demnach circa 70 mm über der Lysimeterkurve. BOWAHALD begeht diesen Fehler nicht. Für Sommer/Herbst 2002 berechnen beide Modelle keine Absickerung, tatsächlich versickern zwischen 1. Mai und 1. Oktober aber 95 mm. In der Summe unterschätzt BOWAHALD deshalb die Absickerung bis zum Ende der Phase 2 um circa 50 mm, während sich die Fehler in den HELP-Berechnungen aufheben.

3. Ab Oktober 2002 steigen die Absickerungsraten im Lysimeterfeld an. In dieser Phase stimmen die modellierten und gemessenen Absickerungsmengen wieder gut überein, so dass die HELP-Summenkurve - bis Anfang Januar 2003 - fast genau auf der Messwertkurve verläuft. BOWAHALD berechnet zwar ebenfalls die ansteigende Absickerungsmengen ab Oktober 2002 recht genau, jedoch bleibt wegen des Fehlers im Sommer (siehe 2.) bis zum Januar 2003 die berechnete um circa 50 mm unter der realen Absickerung.

4. Beide Modelle berechnen ab Februar 2003 praktisch keine Absickerung mehr, obwohl im U-Feld bis Anfang Juni noch fast 100 mm versickern. So erklärt sich der relativ große Unterschied zwischen modellierter und gemessener Absickerung von 117 mm (ca. 19 %) bei HELP und 202 mm (ca. 33 %) bei BOWAHALD.

Dieser Vergleich zeigt, dass beide Modelle in Zeiten mit geringer Verdunstung und mehr oder weniger hohen Niederschlägen (Beispiel: August 2001 bis Mai 2002, [1.] in Abbildung 7; November 2002 bis Januar 2003, [3.] in Abbildung 7) die Absickerung relativ genau berechnen können. Im vorliegenden Beispiel stimmen die HELP-Werte dabei besser mit der Realität überein als die Ergebnisse von BOWAHALD. Im Sommer hingegen bilden beide Modelle die geringfügige - in der Summe jedoch nicht zu vernachlässigende - Absickerung, aus den tieferen Zonen der Rekultivierungsschicht überhaupt nicht ab. Diese Absickerung finden offensichtlich auch bei Wassersättigungen unterhalb der (berechneten) Feldkapazität statt. Im Fall der mächtigen Rekultivierungsschicht der Leonberger Lysimeterfelder sind vermutlich die Prozesse Evapotranspiration in Oberflächennähe (bis circa 1 m Bodentiefe) und Versickerung in noch größerer Tiefe nicht nur räumlich, sondern auch zeitlich weitgehend entkoppelt.

4.2.2 Tageswerte der Absickerung

Im vorigen Abschnitt wurde festgestellt, dass die Wasserhaushaltsmodelle HELP und BOWAHALD die Gesamt-Absickerungsmenge des U-Feldes mit einer Abweichung zwischen circa 19 % und 33 % abbilden konnten. Zeitweise war die Genauigkeit erheblich größer, zeitweise waren die Abweichungen größer. Betrachtet man die Ergebnisse mit einer höheren zeitlichen Auflösung, so treten Unterschiede deutlicher zu Tage. Deshalb sind in Abbildung 8 und Abbildung 9 die Tageswerte der gemessenen und modellierten Absickerung aufgetragen.

Bei höherer zeitlicher Auflösung unterscheiden sich die Kurven von Messung und Modellierung erheblich. Die Absickerungskurve des Lysimeterfeldes ist sehr viel ausgeglichener als die der Modellierungen: Es gibt viel weniger Tage ohne Absickerung und die Spitzenwerte der Tagessummen liegen deutlich niedriger als berechnet. Der höchste im Zeitraum vom 1. August 2001 bis 31. Dezember 2003 gemessene tägliche Abfluss aus dem U-Feld betrug 9,4 mm (am 4.1.2003), die Modelle berechneten maximale tägliche Abflüsse von 23,6 mm (HELP) oder 29,6 mm (BOWAHALD).

Dieser Sachverhalt kann an einem kurzen Zeitausschnitt aus der langen Messreihe beispielhaft verdeutlicht werden. Hierzu wurde der Zeitraum vom 1. April bis 30. Juni 2002 ausgewählt und in Abbildung 9 dargestellt. Wie bereits zuvor beschrieben, berechnen die Modelle für einzelne Tage entweder zu viel oder zu wenig Absickerung. Es zeigt sich auch, dass beide Modelle die Wirkung einzelner Niederschlagsereignisse stark überschätzen (siehe auch Anmerkungen zu Abbildung 7): So berechnete HELP eine Absickerung von 23,6 mm/d und BOWAHALD 26,2 mm/d in Folge von 44,7 mm Regen am 9. Mai 2002. Auf die im Lysimeterfeld gemessenen Absickerungen wirkte sich dieses Ereignis jedoch überhaupt nicht aus. An den Tagen nach dem Starkregen wurden lediglich Absickerungsraten von 1,05 bis 1,63 mm/d gemessen.

Obwohl beide Programme ähnliche Ergebnisse liefern, ergibt sich beispielsweise bei der Betrachtung des Zeitraumes vom 1. bis 15. Mai 2002 ein differenziertes Bild: In dieser Zeit berechnet HELP trotz insgesamt großer Abweichung eine realitätsnähere Verteilung der Absickerung als BOWAHALD (Abbildung 9). Allerdings ist die von HELP berechnete Absickerungsmenge mit 81,9 mm viel zu hoch. BOWAHALD gibt für diesen Zeitraum zwar nur 31,1 mm aus und kommt damit in der Summe der im Lysimeterfeld gemessenen tatsächlichen

Absickerung von 28,7 mm näher. Allerdings ist bei BOWAHALD die Verteilung der Absickerung auf nur zwei Tage weniger realitätsnah als bei HELP.

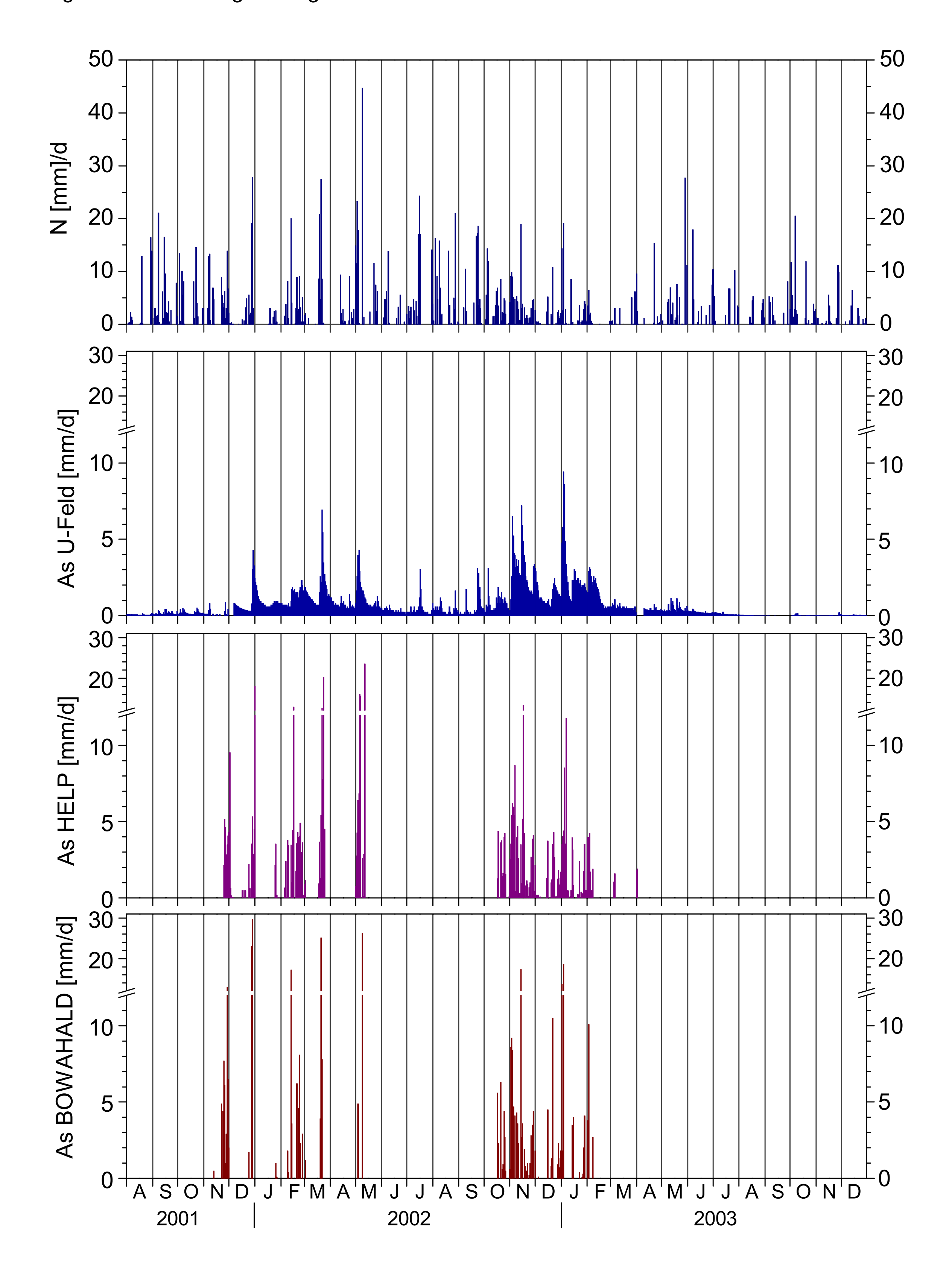


Abbildung 8: Tageswerte der Niederschläge (N), der im Lysimeterfeld U gemessenen sowie der mit HELP und BOWAHALD modellierten Absickerungsraten (As), Zeitraum: 1. August 2001 bis 31. Dezember 2003, alle Werte in [mm/d]

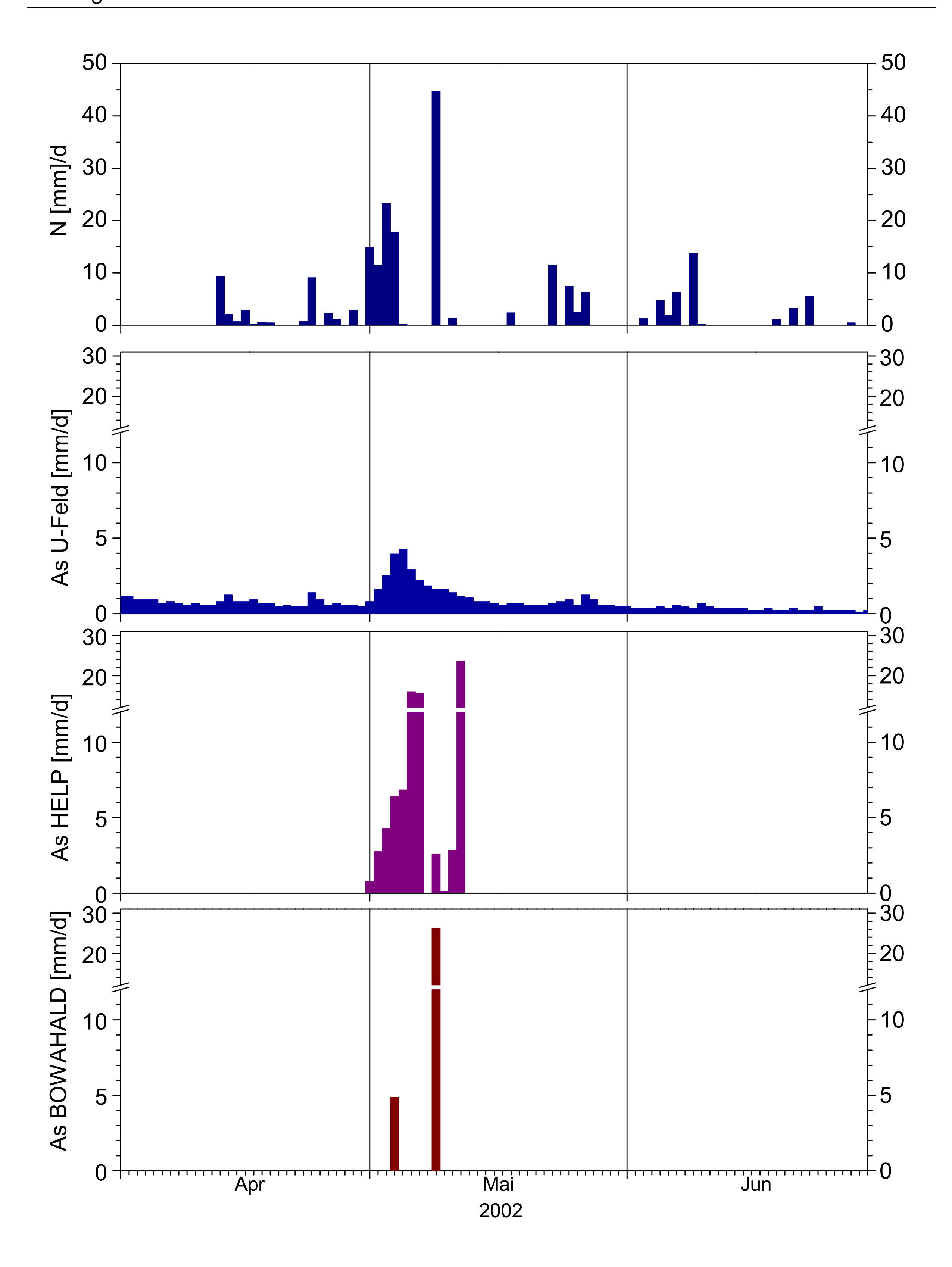


Abbildung 9: Tageswerte der Niederschläge (N), der im Lysimeterfeld U gemessenen sowie der mit HELP und BOWAHALD modellierten Absickerungsraten (As), Zeitraum: 1. April bis 30. Juni 2002, alle Werte in [mm/d]

4.2.3 Fazit Wasserhaushaltsmodellierung

Beide Modelle überschätzen den Oberflächenabfluss deutlich.

Die Genauigkeit der Absickerungswerte nimmt mit zunehmender zeitlicher Auflösung deutlich ab. Einzelne Tageswerte sind praktisch nicht verwertbar, da die Programme die Absickerung in Trockenphasen stark unter- und in Nassphasen sowie außerhalb der Vegetationszeit eher überschätzen. Die isolierte Betrachtung von Einzelereignissen ist somit nicht anzuraten. Das Bemessen von Entwässerungseinrichtungen auf der Basis von Modellierungen ist weniger problematisch: Es beruht zwar auf der Betrachtung von Einzelereignissen, die von den Modellen eher überbewertet werden, hierdurch sind jedoch im Zweifelsfall zusätzliche Sicherheitsreserven gegeben.

Im Beispiel der Leonberger Lysimeterfelder lieferte das Programm HELP genauere Wasserhaushaltsbilanzen als BOWAHALD, jedoch erscheinen auch an HELP substanzielle Korrekturen erforderlich. Lysimeterfelder als Lieferanten valider Vergleichsdaten können hierbei eine wesentliche Rolle spielen.

5 Literatur

AG BODEN (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Aufl., 392 S., Hannover

AKS = ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (1996): Forstliche Standortsaufnahme, 352 S., Eching

BÖNECKE, G. (1994): Forstwirtschaftliche Belange bei der Oberflächenabdichtung und Rekultivierung von Deponien, Schriftenreihe Angewandte Geologie (AGK) 34: 409 – 425, Karlsruhe

BÖNECKE, G. (2001): Verzicht auf Oberflächenabdichtungen durch forstliche Rekultivierung von Deponien - Deponiewald statt Oberflächenabdichtungen?, in: EGLOFFSTEIN, T., & BURKHARDT, G. [Hrsg.]: Oberflächenabdichtungen von Deponien und Altlasten, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis Band 122: 263 - 280

BRAUNS, J., K. KAST, H. SCHNEIDER, W. KONOLD, P. WATTENDORF & B. LEISNER (1997): Forstwirtschaftliche Rekultivierung von Deponien mit TA Siedlungsabfallkonformer Oberflächenabdichtung, Handbuch Abfall Band 13, 97 S. + Anhang, Karlsruhe

DUNGER, V. (2001): Modellierung des Wasserhaushaltes von Systemen zur Oberflächensicherung von Deponien mit dem Deponie- und Haldenwasserhaushaltsmodell BOWAHALD, in: EGLOFFSTEIN, T., G. & BURKHARDT [Hrsg.]: Oberflächenabdichtungen von Deponien und Altlasten, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis Band 122: 179 – 211

SCHROEDER, P.R. & K. BERGER (2004): Das Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Modell, Benutzerhandbuch für die deutsche Version 3, 4. überarb. Aufl., 90 S., Institut für Bodenkunde der Universität Hamburg

WATTENDORF, P., W. KONOLD & O. EHRMANN [Hrsg.] (2005): Rekultivierungsschichten und Wurzelsperren, Culterra Band 41, 268 S., Freiburg

Planung und Gestaltung von Gehölzbewuchs auf Deponien

von Gerhard Schaber-Schoor geb. Bönecke,
Forstliche Versuchsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg

Inhalt

1 Einleitung

In Baden-Württemberg sind wahrscheinlich die meisten ehemaligen Mülldeponien mit Gehölzbewuchs in Form von Wald bedeckt, der entweder angepflanzt wurde oder sich von alleine eingestellt hat oder beides. Dieser Bewuchs reicht meistens aus, um eine Deponie in die umgebende Landschaft einzubinden. Soll ein Bewuchs auf einer Deponie weitere Funktionen erfüllen, wie sie z.B. zur Regulierung des Wasserhaushalts erwünscht sind, sind gewissenhafte planerische Überlegungen zur Anlage und Gestaltung des künftigen Bewuchses erforderlich. Der Beitrag beschreibt, wie eine Planung ablaufen kann und wie sie sich so umsetzen lässt, dass langfristig ein Gehölzbewuchs entsteht, der vor allem durch eine hohe jährliche reale Verdunstung den Sickerwasserzutritt in den Deponiekörper verringert.

2 Ziele von Gehölzbewuchs

Die Ziele bzw. Funktionen die ein Gehölzbewuchs auf einer Deponie erfüllen soll richten sich zum Einen nach den örtlichen Gegebenheiten. Eine Forderung die praktisch immer eine Rolle spielt, betrifft die Gestaltung von Bewuchs im Hinblick auf die Einbindung eines Deponiekörpers in die umgebende Landschaft (ästhetische Funktion). Wobei im allgemeinen gilt, dass eine Einbindung in die Landschaft umso besser gelingt, je mehr ein Bewuchs den Vegetationsstrukturen der Umgebung anpasst wird. Verstärkt hat sich in den letzten Jahren zum Anderen das Bewusstsein, dass ein gut entwickelter Gehölzbewuchs die Grundwasserneubildung und damit die unter der Rekultivierungsschicht abzuleitende Sickerwassermenge wirksam minimiert (Wasserhaushaltsfunktion). Es besteht heute weitgehend Konsens, einen Bewuchs als das oberste Element eines Oberflächenabdichtungssystems anzusehen, das eine wichtige Funktion bei der Wasserhaushaltsregulierung erfüllt. Unter entsprechenden klimatischen Randbedingungen (jährliche Niederschlagsmenge unter 650 mm/Jahr) kann sogar davon ausgegangen werden, dass ein Bewuchs zusammen mit einer qualifizierten Wasserhaushaltsschicht so gut funktioniert, dass keine Absickerung auftritt (MAIER-HARTH et al. 2005).

Dem Bewuchs kommt außerdem die Funktion zu, die Rekultivierungsschicht und das Oberflächenabdichtungssystem vor Witterungseinflüssen und Erosion zu schützen (Schutzfunktion). In diesem Zusammenhang spielt es eine Rolle, dass durch den Bewuchs selbst keine Schäden an einer Oberflächenabdichtung entstehen. Hierzu sei angemerkt: Schäden an Entwässerungs- und Dichtungssystemen durch tief reichende Baumwurzeln bzw. Beschädigungen durch ausgehebeltes Wurzelwerk sind weitgehend ausgeschlossen, wenn eine Rekultivierungsschicht eine Dicke von mehr als 2,5 Meter aufweist. Wie Untersuchungen an vom Sturm geworfenen ausgewachsenen Waldbäumen (Laub- und Nadelbäume) zeigten, reichen ausgehebelte Wurzelballen und der dadurch gestörte Bodenbereich selten tiefer als 1,5 bis 2,0 Meter (ALDINGER et al. 1996).

Inwieweit es bei der Planung und Gestaltung von Gehölzbewuchs auf Deponien möglich und sinnvoll ist Überlegungen zu Nachnutzungen anzustellen die auf eine Gewinn bringende Bewirtschaftung von Gehölzbeständen abzielen, ist noch wenig untersucht. Auf die Ergebnisse einer vom Bundesamt für Naturschutz hierzu geförderten Machbarkeitsstudie wird in Kapitel 5.3 dieses Beitrags kurz eingegangen.

3 Planung von Gehölzbewuchs

3.1 Vorplanung

Eine Unterscheidung zwischen Vorplanung und Planung wird hier unter Bezug auf den Zeitpunkt, zu dem planerische Überlegungen über einen künftigen Bewuchs angestellt werden, getroffen. Der Begriff Vorplanung soll als Terminus für das Anfertigen einer Konzeption oder Studie stehen, in der Grundzüge einer künftigen Begrünung dargestellt werden. Der wesentliche Unterschied zur Planung besteht darin, dass zum Zeitpunkt der Ausarbeitung der Vorplanung noch keine detaillierten Aussagen über die tatsächliche Gestaltung einer Begrünung oder die Art und Weise ihrer Ausführung getroffen werden können. Die Vorplanung fällt sinnvoller Weise in einen Zeitabschnitt, in dem die endgültige Oberflächengestaltung des Deponiekörpers festgelegt ist bzw. gerade realisiert wird. Zu diesem Zeitpunkt liegen Pläne vor aus denen die Flächen, die für eine Folgenutzung mit Gehölzbewuchs in Frage kommen,

ermittelt werden können. Dazu sollen die Pläne (M 1:500 bis 1:1.500) neben topographischen Informationen mindestens folgende Angaben enthalten:

- Bauwerke mit Zufahrtswegen sowie Wege zur Erschließung des Geländes die dauerhaft von Gehölzbewuchs freigehalten werden müssen bzw. zu denen mit Gehölzen aus betrieblichen Gründen eine Mindestabstand einzuhalten ist
- Anlagen zur Oberflächenentwässerung wie Gräben, Schächte, Verrohrungen
- Leitungen die ggf. in der Rekultivierungsschicht untergebracht werden mit Angaben zur Funktion (z.B. Entgasung) und Verlegetiefe; Leitungen die unter der Entwässerungsschicht liegen sind nicht relevant, und
- Flächen die aus gestalterischen Gründen von Gehölzen freigehalten werden sollen.

Es stehen damit die Informationen zur Verfügung die notwendig sind um die Flächen abzugrenzen, die prinzipiell für einen Gehölzbewuchs in Betracht kommen. Über weitere Angaben, wie zum Klima, zur Lage und zur Exposition von potenziellen Gehölzflächen lassen sich erste Aussagen zu geeigneten Baum- und Straucharten treffen. In dieser Phase wird auch schon ein Vorschlag zur Herstellung der Rekultivierungsschicht bzw. Wasserhaushaltsschicht unterbreitet. Dieser Vorschlag, der sich hauptsächlich mit der Eignung der Rekultivierungsschicht als Pflanzenstandort befasst, soll z.B. Hinweise enthalten, welche im Einzugsgebiet einer Deponie vorkommenden Böden geeignet sind, um sie bei entsprechender Verfügbarkeit für die Rekultivierung zu beschaffen.

Die Vorplanung soll für den Bauingenieur außerdem Grundlage sein, um Lösungen zur baubetrieblichen Herstellung einer qualifizierten Rekultivierungsschicht auszuarbeiten. Jeder Bauingenieur wird den Einbau einer Rekultivierungsschicht zunächst unter dem Aspekt der Standsicherheit betrachten, was im klassischen Erdbau im allgemeinen bedeutet, dass möglichst hohe Einbaudichten gefordert werden. Die Bedeutung einer Vorplanung für eine Folgenutzung wie Gehölzbewuchs liegt besonders darin, den Bauingenieur frühzeitig auf boden- und pflanzenkundliche Gesichtspunkte bei der Gestaltung der Rekultivierungsschicht hinzuweisen. Ohne deren Beachtung bei der Materialwahl, der Dimensionierung und dem Aufbau der Rekultivierungsschicht ist es erfahrungsgemäß nicht möglich, einen für Gehölzbewuchs gut geeigneten Standort herzustellen.

3.2 Planung

Die Planung eines Gehölzbewuchses muss auf der Grundlage der „örtlichen Bedingungen“ erfolgen. Denn eine möglichst exakte Kenntnis der Boden- und Klimabedingungen, welchen Gehölze an einem bestimmten Standort ausgesetzt sein werden, ist eine grundlegende Voraussetzung, ohne die optimale Ergebnisse bei einer Begrünung nicht erzielt werden können. Durchgeführt wird die Planung deshalb erst nach dem die Rekultivierungsschicht entsprechend den Empfehlungen der Vorplanung, z.B. zu geeigneten Böden, und unter Einhaltung der technischen Vorgaben zum Bodeneinbau, z.B. lockerer Einbau durch Verkippen, in größeren Abschnitten bzw. im Ganzen fertig gestellt wurde. Um die örtlichen Bedingungen zu erfassen, wird die Anfertigung eines Standortsgutachtens in Anlehnung an die vom LANDESARBEITSKREISES FORSTLICHE REKULTIVIERUNG VON ABBAUSTÄTTEN (2000) bzw. von BÖNECKE (2000) für die Planung der Wiederaufforstung von Materialentnahmestellen vorgeschlagene Methode empfohlen. Hingewiesen sei auch auf Untersuchungen von

RICHTER et al. (2001), bei denen mit derselben Methode eine bodenkundliche Bewertung einer temporären Oberflächenabdichtung durchgeführt wurde, mit dem Ziel, die Überführungsmöglichkeit in eine TA Siedlungsabfall-konforme Abdichtung zu prüfen. Im folgenden wird erläutert, wie ein Standortsgutachten auf einer Deponie entsteht und wie anhand einer Erkundung vor allem der Bodenverhältnisse eine Empfehlung von geeigneten Baum- und Straucharten bzw. zu Gehölzgesellschaften Zustande kommt.

3.2.1 Erfassung und Bewertung der Standortsverhältnisse

Ausgegangen wird hier von dem Fall einer Deponie, deren Rekultivierungsschicht aus Bodenaushub aus verschiedenen Baustellen, der mehr oder weniger in wahlloser Folge angeliefert wurde, aufgebaut ist. Gemäß den Ergebnissen einer von der Forstlichen Versuchsanstalt Freiburg beauftragten Studie zur Anwendung des Standortsgutachtens auf Deponien (WATTENDORF &EHRMANN 2003) wird zu folgender Vorgehensweise geraten:

1. Die gesamte aufzunehmende Fläche wird begangen, wobei eine grobe Einteilung in Teilflächen nach topografischen Merkmalen (Lage von Wegen, Bermen usw.) und nach dem Relief (Ebene, Böschung, Exposition) erfolgt. Ist für einzelne Bereiche der Rekultivierungsschicht Material einheitlicher Herkunft verwendet worden bzw. das Einbauverfahren bekannt, soll vorrangig nach diesen Merkmalen eine Einteilung vorgenommen werden.
2. Je Teilfläche wird eine ausreichende Zahl von Bohrpunkten für die bodenkundlichen Erhebungen mit dem Pürckhauer-Erdbohrstock bestimmt. Die Zahl der Bohrpunkte richtet sich nach dem Ziel der Aufnahme, die „durchschnittlichen“ Bodeneigenschaften einer Einheit sowie die Größenordnung der Abweichungen von den durchschnittlichen Bedingungen möglichst exakt zu beschreiben.
3. Die Bodenerkundung mit dem Erdbohrstock wird an den festgelegten Bohrpunkten durchgeführt (zum Umfang der Bodenansprache am Bohrpunkt siehe Kasten).
4. Anhand der Auswertung der Bohrpunktkartierung wird die Abgrenzung der Teilflächen überprüft und ggf. nach den vorherrschenden Bodenbedingungen unter Beachtung topographischer Merkmale und des Reliefs neu festgelegt. Bei der Bildung von Einheiten ist zu beachten, dass die Flächengröße nicht zu klein ausfällt. Als günstig, für die spätere Gestaltung des Gehölzbewuchses, haben sich Flächen ≥ 0,3 Hektar erwiesen.
5. Da einige bodenkundliche Merkmale in Bohrstockproben nicht oder nur unzureichend bestimmt werden können, werden mit Hilfe der Ergebnisse der Bohrstockerkundungen die Lage von Bodenaufschlüssen (Bodenprofile) zur weiteren Bodenansprache ermittelt. Je Teilfläche reicht es in der Regel aus, ein Profil aufzugraben und zu untersuchen (zum Umfang der Bodenansprache am Bodenprofil siehe Kasten „Umfang der Standortskartierung“).

Bei der Durchführung der Bodenerkundung mit dem Erdbohrstock ist die Mächtigkeit des potentiellen Wurzelraums (auch physiologische Gründigkeit oder Durchwurzelbarkeit) im Hinblick auf die spätere Bewertung ein sehr wichtiger Parameter. Zur Einstufung der Gründigkeit (AG BODEN 1994) müssen Begrenzungsfaktoren des Wurzelraumes berücksichtigt und erhoben werden, wie größere Steine, hohe Lagerungsdichten in Verbindung mit der

Bodenart und Reduktionsmerkmale wie Graufärbung, die allerdings erst ein bis zwei Jahre nach dem Aufbringen der Rekultivierungsschicht erkennbar einsetzt.

Umfang der Standortskartierung

Folgende Standortsfaktoren sind nach Einbau der Rekultivierungsschicht zu ermitteln, zu beschreiben und in Kartenform darzustellen:

Lage:

Beschreibung und Abgrenzung nach der Geländemorphologie, Exposition und Hangneigung (z.B. südexponierte flache Böschung, Böschungsfuß, Kuppe, Mulde, Plateau usw.)

Boden:

1. Beschreibung je Bohrpunkt (alle 30 – 50 m im Quadrat): maximale Bohrtiefe (bei Rekultivierungsschicht < 1,0 m), vorherrschende Bodenart in Tiefenstufen 0 – 20, 20 – 50, 50 – 100 cm (bei sichtbarer Schichtenfolge sind Tiefenstufen anzupassen), Carbonatgehalt des Feinbodens, Humusgehalt (geschätzt), Auffälligkeiten (z.B. Staunässezeichen, Schichtsprünge usw.), relative Dichte (Einschläge bis ein Meter Tiefe), Durchwurzelungstiefe.
2. Beschreibung je Bodenprofil[1)]: Bodenart (Fingerprobe), Bodenfarbe (Farbtafeln), Bodentyp, Carbonatgehalt des Feinbodens, Humusgehalt (geschätzt), Steingehalt in Vol.-%, Bodengefüge, Lagerungsdichte (5 Stufen, Feldmethoden), Untergrundbeschaffenheit, Besonderheiten. Bei bewachsenen Flächen zusätzlich Gesamtmächtigkeit des Wurzelraumes und Vegetation.
3. Analyse von Bodenproben aus Bodenprofil[2)]: pH-Wert, Kohlenstoffgehalt (C), Stickstoffgehalt (N), Phosphorgehalt (P), C/N- und C/P-Verhältnis, Trockenraumdichte (TRD) in Gew.-% (als oberer Richtwert gilt 1,3 g/cm^3 bis 1,5 g/cm^3, TRD über 1,5 g/cm^3 ist als deutlich wurzelhemmend zu bewerten), Skelettanteil in Gew.-% und nutzbare Wasserkapazität[3)] des effektiven Wurzelraums (nWSK WReff) nach Schätzmethode AKS 1996.

Niederschläge:

Menge, Verteilung über das Jahr / innerhalb der Vegetationsperiode

Temperatur:

Ariditätsindex (Verdunstung größer / kleiner Infiltration), Spätfrostgefahr

1) mindestens 1 Profil je ausgewiesener Standortseinheit (= Leitprofil), durchschnittlich ein Profil je ha bei größeren Flächen einer Standortseinheit. Tiefe 1,0 bis 1,5 m, Probennahme in Tiefenstufen 0 – 20, 20 – 50 und 50 – 100 cm, ggf. angepasst an Schichtenfolge.

2) Probennahme in Tiefenstufen 0 – 20, 20 – 50 und 50 – 100 cm, ggf. angepasst an Horizonte

3) nutzbare Wasserspeicherkapazität (nWSK) syn. nutzbare Feldkapazität (nFK)

Die endgültige Zuordnung der Teilflächen zu sog. Standortseinheiten und deren Abgrenzung in Plänen erfolgt anhand der ausgewerteten Bodendaten, nach der Lage (Relief, Hangneigung, Exposition) und den klimatischen Gegebenheiten. Eine Standortseinheit ist dann eine Zusammenfassung von Flächen, die sich so ähnlich sind, dass die Möglichkeiten einer Folgenutzung nicht wesentlich voneinander abweichen und die langfristig annähernd gleiche

Entwicklungsmöglichkeiten, hier für Gehölzbewuchs, bieten. Für die Planung von Gehölzbewuchs bewährt hat sich eine Bildung von Standortseinheiten nach den Leitparametern Gründigkeit und nutzbare Wasserspeicherkapazität. In Karten sollen durch zusätzliche Signaturen solche Flächen gekennzeichnet werden, auf welchen bei einer Begrünung mit ziemlicher Sicherheit Probleme zu erwarten sind. Das sind Bereiche mit Böden deren Grobbodenanteil (Korngröße > 2 mm) mehr als > 30 - 40 Vol-% beträgt, Flächen mit Bodenverdichtungen und Staunässe, flachgründige Standorte, auf denen wegen mechanischer Begrenzungen eine Durchwurzelung bis höchstens 30 cm Tiefe zu erwarten ist (vergleiche Abbildung 1), sowie Mulden und Senken mit Frostgefährdung durch Kaltluftstau.

Sind einzelne Standortseinheiten entsprechend den Anforderungen in Tabelle 1 nicht bzw. nur bedingt für Gehölzbewuchs geeignet, können im Standortsgutachten ggf. Maßnahmen zur Bodenverbesserung, wie eine Tiefenlockerung, vorgeschlagen werden. Dies sollte jedoch die Ausnahme sein. Bei Anwendung der GDA-Empfehlung E2-31 – Rekultivierungsschichten, Entwurf (DGGT 2000) und unter Beachtung in der Praxis gewonnener Kenntnisse (z.B. MAIER-HARTH et al. 2005, WATTENDORF et al. 2005) ist es durchaus möglich, Bodenabdeckungen so herzustellen, dass zumindest für die Etablierung eines Gehölzbewuchses keine Nacharbeiten erforderlich sind.



Abbildung 1: Die Aufnahmen zeigt das Wurzelwerk einer etwa 9jährigen Kiefer (*Pinus sylvestris*). Der Baum wurde auf einer Deponieabdeckung aus einem konventionell eingebauten tonigen Unterboden und einem rd. 30 cm mächtig humosen Oberboden freigelegt. Der Unterboden ist so dicht, dass die Wurzeln in einer für diese Baumart wenig typischen Weise fast nur nach den Seiten und nicht in die Tiefe gewachsen sind. Auf Standorten so geringer Gründigkeit ist vor allem das Risiko von Trockenschäden hoch.

Tabelle 1: Anforderungen an die Substrateigenschaften einer Rekultivierungsschicht für Gehölzbewuchs auf Deponien mit Oberflächenabdichtung die mindestens eingehalten werden sollen.

Anforderungen an eine Rekultivierungsschicht für Gehölzbewuchs über einer Oberflächenabdichtung		
Parameter	**anzustrebende Kennwerte**	**Prüfung der Kennwerte**
Mächtigkeit	250 – 300 cm	Erdbohrstock
Gründigkeit	> 100 cm	Eindringwiderstand Erdbohrstock
Hauptbodenarten	Schluff, schluffige Sande, lehmige Sande, schluffige Lehme und sandiger Lehm	Bodenproben Erdbohrstock oder Bodenprofil
Grobbodenanteil	< 30 %	Bodenprofil
Humusgehalt (Oberboden)	> 4 %	Laborprüfung
Trockendichte	< 1,45 g/cm^3	Laborprüfung
Nutzbare Wasserspeicherkapazität	> 220 mm	nach AG Boden 1994 oder AKS 1996
pH-Wert	5,0 – 7,5	Laborprüfung

Das Anfertigen eines Standortsgutachtens als fachliche Grundlage für die Planung von Gehölzbewuchs auf Deponien bedeutet zwar einen zusätzliche Aufwand, der gemessen an den Schwierigkeiten und Fehlschlägen bei Rekultivierungen aber mehr als vertretbar ist. Es sollte deshalb möglich sein, das Standortsgutachten als festen Bestandteil in das Qualitätsmanagement von Arbeiten zur Begrünung von Deponien zu integrieren.

3.2.2 Empfehlung geeigneter Baum- und Straucharten

Das Standortsgutachten gibt für jede Standortseinheit eine Empfehlung zu geeigneten Gehölzarten. Grundlage für die Auswahl der Arten sind Beschreibungen zu deren Boden- und Klimaansprüchen bzw. auch zum Wuchsverhalten. Angaben zu den Boden- und Klimaansprüchen von Bäumen und Sträuchern die für einen Bewuchs auf Deponien geeigneten sind, finden sich z.B. im von der LfU (1997) herausgegebenen Handbuch Abfall - Forstwirtschaftliche Rekultivierung von Deponien mit TA Siedlungsabfall-konformer Oberflächenabdichtung. Zum Vorgehen bei der Zusammenstellung mehrerer Gehölzarten zu sog. Zielwaldtypen siehe Empfehlungen z.B. in LANDESARBEITSKREIS FORSTLICHE REKULTIVIERUNG VON ABBAUSTÄTTEN (2000).

3.2.3 Planung eines Deponiewaldes

Einen wichtigen Beitrag zur langfristigen Sicherung von Deponien leistet ein Bewuchs, der die Infiltration von Niederschlag in die Entwässerungsschicht wirkungsvoll minimiert. Am Besten kann das durch den Aufbau eines Mischwaldes, eines sog. „Deponiewaldes“ erreicht werden. Die Definition des Deponiewaldes (BÖNECKE 2001) beschreibt einen überwiegend

aus Waldbäumen bestehenden Bewuchs, der vor allem im Hinblick auf seine Funktion im Wasserhaushalt angelegt und gestaltet wird: „Deponiewälder tragen durch ihre Zusammensetzung, ihren mehrschichtigen Aufbau und eine intensive und tiefe Bodendurchwurzelung nachhaltig zu einer hohen realen Verdunstung und damit zu einer Dämpfung und Minimierung des Abflusses bei. Deponiewälder werden so gestaltet, dass sie den vorherrschenden standörtlichen und klimatischen Verhältnissen entsprechen und sich selbst verjüngen. Es ist erforderlich, Deponiewälder zur Erhaltung eines mehrschichtigen Bestandesaufbaus und zur Förderung der natürlichen Verjüngung zu pflegen. Langfristig sollen in einem Deponiewald alle Baumaltersklassen (jung, mittelalt, alt) etwa zu gleichen Anteilen vorkommen."

Tabelle 2: Entwicklung eines Deponiewaldes von der Bestandesbegründung bis zum Zielzustand über etwa 100 Jahren. Der Zielzustand wird durch eine Erhaltungspflege (= Dauerwaldpflege) gesichert (verändert nach BÖNECKE 2001).

Entwicklung eines Deponiewaldes aus Bepflanzung			
	Entwicklungsschritt	**Maßnahme**	**Jahr**
Pflanzplan	Bestandesbegründung	Pflanzung **Vorwald**: Pioniergehölze, ca. 1500 Bäume/ha	1
	Nachbesserung	Nachpflanzung bei flächigen Ausfällen	2 - 3
	Kulturpflege	nach Bedarf	2 - 5
Pflege- oder Entwicklungsplan	Umbau Vorwald	Entnahme von ca. 50 % der vorhandenen Bäume; Pflanzung **Zielwald**: anspruchsvolle Gehölzarten, ca. 3000 Bäume/ha	15 - 20
	Nachbesserung	Nachpflanzung bei flächigen Ausfällen	15 - 20
	Kulturpflege/ Jungwuchspflege	nach Bedarf	15 - 25
	Läuterungspflege	Reduktion auf 2500 Bäume /ha	30 - 35
	Durchforstungen	Im Zehnjahresturnus Eingriffe in Abhängigkeit von der Waldentwicklung mit weiterer Reduktion der Baumzahl Reduktion auf 250 – 400 Bäume/ha	40 - 75 80 - 90
	Einleitung Naturverjüngung	Entnahme einzelner Bäume/Baumgruppen aus Oberstand	> 90
	Dauerwaldpflege	Entnahme einzelner Bäume/Baumgruppen zur Förderung der vertikalen Schichtung und der Naturverjüngung; Baumzahl im Oberstand bleibt bei ca. 250 Bäume/ha = Zielzustand	> 100 usw.

Geeignete Instrumente um die verschiedenen Maßnahmen darzustellen die über viele Jahre durchgeführt werden müssen bis ein Deponiewald entsteht, sind ein Pflanz- und ein Pflege- oder Entwicklungsplan. Diese Pläne geben vor, über welche Entwicklungsschritte der dauer-

haft gewünschte Zustand erreicht wird. Tabelle 2 zeigt beispielhaft, wie die Entstehung eines Deponiewaldes über die Stufen „Vorwald“ und „Zielwald“ ablaufen könnte.

Bei allen Bemühungen um die Herstellung von qualifizierten Rekultivierungsschichten bleibt stets zu berücksichtigen, dass künstlich geschaffene Standorte die Voraussetzungen für ein ungestörtes Gedeihen von Pflanzen nur eingeschränkt erfüllen. Die Ursachen sind durch Umlagerung (Bodenausbau, -lagerung, -einbau) bedingte Verluste von gewachsenen Bodenstrukturen und damit einhergehende Störungen des Bodenluft- und Bodenwasserhaushalts sowie eine verminderte biologische Aktivität. Vor allem auf größeren Rekultivierungsflächen können durch klimatische Extreme, wie Kälte, Frost und Hitze, so unwirtliche Bedingungen auftreten, dass empfindliche Gehölzarten nicht angesiedelt werden können. Bei der Umlagerung von Böden kommt es durch die Durchmischung von oberen mit unteren Bodenschichten teils zu einer veränderten Bodenreaktion. Natürlich gelagerte (Wald)Böden weisen im Oberboden leicht saure Reaktionswerte auf, so wie sie von den meisten heimischen Gehölzen bevorzugt werden (pH 5 bis 5,5). Bei Rekultivierungsschichten treten hingegen immer wieder erhöhte pH-Werte auf, was ab einer mittleren Alkalität (pH 8) dazu führt, dass die Gehölzartenwahl stark eingeschränkt ist.



Abbildung 2: Blick über verschieden alte Vorwaldpflanzungen. Im Vordergrund ca. 5-6 Jahre alte Pflanzung mit Weiden (*Salix spec.*) und Grauerle (*Alnus incana*). Im Hintergrund eine 8-9 Jahre alte, gleichmäßig mit Mehlbeere (*Sorbus aria*) überstellte Fläche. Testfelder auf Rekultivierungsflächen in einer Kiesgrube bei Radolfzell.

Beachtet man die aufgezählten Erschwernisse bei der Begrünung von Rekultivierungsflächen, so ist verständlich, dass man bei der Begründung eines Deponiewaldes zunächst mit einer Pflanzung von Pioniergehölzen, einem sog. Vorwald beginnt. Mit Gehölzarten besonders der Gattungen Erle (*Alnus spec.*), Pappel (*Populus spec.*), Weide (*Salix spec.*), Birke (*Betula spec.*), Vogelbeere, Mehlbeere (*Sorbus spec.*) und Kiefer (*Pinus spec.*) lassen sich robuste Gehölzbestände aufbauen (vergleiche Abbildung 2). Ziel eines Vorwaldes ist vor

allem die Förderung der Bodenbildung und die Milderung klimatischer Extreme. Günstig auf die Bodenbildung wirkt sich z.B. das leicht abbaubare Laub von Erlen oder Weiden aus. 5 bis 10 Jahre nach der Bepflanzung ist je nach Pflanzverband und Wüchsigkeit der Gehölze der Baumbewuchs soweit gediehen, dass eine weitgehende Überschirmung des Bodens besteht, was u.a. Temperaturextreme dämpft. Der Anteil der Pionierbaumarten wird nach einigen Jahren (15 – 20 Jahre) zugunsten anspruchsvollerer Baum- und Straucharten reduziert. Gepflanzt werden diese unter dem Kronenschirm, des vorher stark durchforsteten Vorwaldes (vergleiche Tabelle 2, Pflanzung Zielwald). Soweit solche Arten durch natürliche Verjüngung auftreten werden sie übernommen. Für die folgende Entwicklung eines aus bis zu vier Schichten aufgebauten Deponiewaldes (1. Schicht = Krautschicht, 2. Schicht = Strauchschicht mit Baumverjüngung auch sog. Unterwuchs, 3. Schicht = niedere Baumschicht oder sog. Zwischenstand und 4. Schicht = herrschende Baumschicht oder sog. Oberstand) ist eine fortlaufende Pflege (1x - 2x im Jahrzehnt) unerlässlich.

Etwa 100 Jahre nach Begründung des Vorwaldes sollte ein Deponiewald den angestrebten Zielzustand erreicht haben (Zielwald). Das heißt: Die für den Zielwald geplanten Baum- und Straucharten sind vorhanden, wobei, soweit es die standörtlichen Voraussetzungen zulassen, eine Hauptbaumart entweder Eiche oder Kiefer ist. Nadelholzarten (ganzjährig hohe Interzeptionsverdunstung) sollen mindestens 20 % der Waldfläche überschirmen, bei höheren Jahres- bzw. Winterniederschlägen bis maximal 50 % der Fläche. Der Waldaufbau ist mindestens dreischichtig. Die Hauptbaumarten (Baumart oder Baumartenkombination von bis zu drei Arten die zusammen einen Flächenanteil von 30 % bis 70 % im Mittel 50 % haben) sollen sich natürlich verjüngen. Es gibt keine Kahlflächen. Zur dauerhaften Sicherung des Zielzustandes wird eine Erhaltungspflege durchgeführt (1x im Jahrzehnt), bei der einzelne Bäume entnommen werden. Die Pflege zielt in erster Linie auf den Erhalt der vertikalen Stufigkeit und die Förderung der Naturverjüngung ab.

Wald ist als Bewuchs natürlich nur ein Vegetationstyp, der sich zur Begrünung von Deponien anbietet. Neben Wald kommt Grünland, verschiedene Formen von Buschbeständen und auch eine ungelenkte Vegetationsentwicklung durch spontane Pflanzenansiedlung in Frage. Letzteres führt über eine Reihe von Entwicklungsstufen, beginnend mit gras- und krautreichen Stadien, am Ende der Sukzessionsreihe schließlich auch zu Wald (WATTENDORF & SOKOLLEK 2000). Dessen Zusammensetzung ist dann zufällig und muss fallweise durch Pflegeeingriffe oder ergänzende Bepflanzung variiert werden. Welchem Vegetationstyp man bei der Rekultivierung den Vorzug gibt, ist nach den jeweiligen lokalen Gegebenheiten festzulegen (z.B. Einbindung der Deponie in die umgebende Landschaft). Dafür, sich gleich für einen Deponiewald zu entscheiden spricht, dass Wald an mitteleuropäischen, von Grundwasser unbeeinflussten Standorten im Flachland und in unteren Mittelgebirgslagen die höchste jährliche reale Verdunstung aufweist (BERGER & SOKOLLEK 1997). Der für eine wirksame Abflussverminderung erforderlicher Waldzustand wird nach 25 - 30 Jahren erreicht und kann durch eine entsprechende Waldpflege relativ einfach weiter entwickelt und schließlich auf Dauer erhalten werden. Außerdem ist nach einer Entwicklungszeit von 10 – 15 Jahren eine – verglichen mit Grünland – nur noch sehr extensive Pflege erforderlich (1 - 2x im Jahrzehnt). Ein an die Standortsverhältnisse angepasster Wald weist eine geringe Anfälligkeit gegenüber biotischen und abiotischen Schäden auf und durch Nutzung entnommene bzw. abgestorbene Bäume wachsen durch natürliche Verjüngung von selbst nach.

4 Begrünungsverfahren

4.1.1 Pflanzung und Ansaat

Das üblichste Verfahren zur Begründung von Gehölzbeständen ist die Pflanzung. Die Darstellung aller in Frage kommenden Methoden führt hier zu weit. Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass auf unproblematischen Standorten, d.h. solchen die gewachsenen Böden relativ nahe kommen, einfache Verfahren wie Spalt- oder Winkelpflanzung mit wurzelnackten Pflanzen gut geeignet sind. Auf Rohböden ist die Lochpflanzung, z.B. bei der Begründung eines Vorwaldes, vorzuziehen. Bei der Lochpflanzung lässt sich der Anwuchserfolg durch Wässern und das Anbringen einer Mulchscheibe zum Schutz gegen übermäßige Verkrautung verbessern. Die Pflanzung von wurzelnackten Pflanzen ist nur während der Vegetationsruhezeit, von Ballen- und Containerpflanzen das ganze Jahr über möglich. Wegen der höheren Bodenfeuchte am Ende des Winters wird auf weitgehend vegetationsfreien Böden am Besten immer zu Beginn der Vegetationszeit gepflanzt.

Für eine ganze Reihe von Gehölzarten kommt auch eine Ansaat in Frage. Bewährt haben sich auf humuslosen Flächen vor allem die Mulchsaat und die Anspritzsaat (Nass-Saat, Hydrosaat). Bei beiden Verfahren streut oder spritzt man eine Mischung aus Saatgut, Dünger und Bodenverbesserungsstoffen auf die zu begrünende Fläche. Bei der Mulchsaat wird auf das Gemisch eine etwa 10 cm dicke Schicht aus langhalmigem Stroh aufgebracht und mit speziellen pflanzenverträglichen Klebern, z.B. einer Bitumenemulsion, fixiert. Bei der Anspritzsaat werden alle Komponenten zusammen mit einem Kleber, Wasser und gehäckseltem Stroh zu einem Brei angerührt und mit einer Dickstoffpumpe versprüht (ZEH 1993). Beide Verfahren haben unter Kostengesichtspunkten dort Vorteile, wo mit einem Arbeitsgang mehrere Anforderungen an eine Begrünung erfüllt werden müssen. Das sind ein sofort wirksamer Schutz gegen Oberflächenerosion (Rillenerosion), der durch das beigemischte bzw. ausgebreitete und verklebte Stroh erreicht wird. Die Sicherung einer ausreichenden Pflanzenernährung geschieht durch Beigabe von Dünger und eine rasche Keimung/Etablierung von Pflanzen durch Ausgleich mikroklimatischer Extreme in Bodennähe durch die Strohabdeckung. Außerdem sind auf grobsteinigen Böden Ansaaten gegenüber einer Pflanzung wegen der bei der Herstellung der Pflanzlöcher auftretender Erschwernisse teilweise günstiger. Ansaaten werden immer während der Vegetationszeit ausgeführt.

4.1.2 Ingenieurbiologische Bauweisen

Von den zur Böschungsstabilisierung in Frage kommenden ingenieurbiologischen Bauweisen sind die sog. Lagenbauten (Buschlage, Heckenlage und Heckenbuschlage) zur Erhöhung der Standsicherheit von Rekultivierungsschichten auf steileren Deponieböschungen in einem Neigungsbereich von > 18° - 20° und < 35° - 37° besonders interessant. Zum Einen ist es durch die armierende Wirkung der Astlagen (vergleiche Abbildung 3) möglich, einen unverdichteten Einbau der Rekultivierungsschicht auch in steileren Böschungsbereichen zu praktizieren und zum Anderen bildet sich aus den verwendeten ausschlagfähigen Ästen vielfach eine so üppige Pioniervegetation, dass auf eine weitere Bepflanzung verzichtet werden kann.

Nach den Ergebnissen von Untersuchungen von 2000 bis 2004 auf einem Testfeld auf der Kreismülldeponie Leonberg, Lkr. Böblingen, ist davon auszugehen, dass mit Hilfe von Lagenbauten eine locker eingebaute Rekultivierungsschicht auf steileren Deponieböschung

in sich standfest hergestellt werden kann. Die für die Gesamtstandsicherheit einer steileren Deponieböschung maßgebenden Gleitfugen sind im Endzustand, d. h. nach Erreichen der maximalen Durchwurzelung nach etwa 5 Jahren, dann unterhalb der Rekultivierungsschicht anzunehmen. Voraussetzung ist eine fachgerechte Bauausführung, ein sorgsamer Umgang mit den ausschlagfähigen Ästen und eine Einbautiefe der Äste von 1/2 bis 2/3 der Schichtdicke der Rekultivierungsschicht (SCHABER-SCHOOR 2005).



Abbildung 3: Einbau einer Buschlage. Fertig ausgelegte lebende Äste von Weiden (*Salix spec.*) kurz vor dem Abdecken mit Boden. Maßnahme zur Sicherung einer Steilböschung auf der Deponie Blumentobel, Lkr. Esslingen (Foto: König).

4.1.3 Naturverjüngung

Auf Rekultivierungsflächen ist es teilweise möglich, einen Vorwald aus spontan ankommenden Gehölzen (Naturverjüngung) z.B. der Gattungen *Salix*, *Populus, Betula* oder *Pinus* zu entwickeln. Allen Arten dieser Gattungen ist gemeinsam, dass sie schon als junge Bäume regelmäßig große Mengen vom Wind leicht ausbreitbarer Samen produzieren und so in der Lage sind, auch weit von der jeweiligen Mutterpflanze entfernte Areale zu erschließen. Allerdings ist es erst nach einer Entwicklungszeit von mindestens zwei Vegetationsperioden nach dem Einbau der Rekultivierungsschicht möglich einigermaßen zuverlässig zu beurteilen, ob die Zahl der natürlich angekommenen Gehölze für die gewünschte Begrünung ausreicht. Nach der zweiten, spätestens der dritten Vegetationsperiode steigt nach den vorliegenden Erfahrungen der Naturverjüngungsvorrat kaum mehr an, da sich dann Bestände aus Wildkräutern und Gräsern flächendeckend ausgebreitet haben und eine weitere natürliche Gehölzansiedlung stark erschweren. Ob spontaner Gehölzbewuchs für eine Erstbegrünung ausreicht, kann mit einem einfachen Verfahren festgestellt werden. Es handelt sich um ein Stichproben-Inventurverfahren, mit dem sich die Verteilung der Dichten und der Höhe der

Pflanzen, der Baumarten und ihre Durchmischung darstellen lässt (GADOW & MESKAUSKAS 1997). Flächen für die sich ein Bestand von > 400 - 800 Bäumchen/ha mit einer Höhe > 50 cm ergibt, können bei etwa gleichmäßiger Verteilung der Pflanzen auf den Flächen für z.B. einen Vorwald als ausreichend bestockt betrachtet werden. Es sind dann keine zusätzlichen Pflanzmaßnahmen notwendig.

5 Gestaltung von Gehölzbewuchs

5.1 Nichtstun oder Mindestpflege?

Sind Pflegeeingriffe vorgesehen so dienen sie dazu, die Entwicklung eines Bewuchses in eine gewünschte Richtung zu lenken, z.B. bezüglich der Artenzusammensetzung. Bezogen auf Wald, als Bewuchs auf rekultivierten Hausmülldeponien, werden im folgenden Pflegemaßnahmen vorgestellt, die auf eine Optimierung der Wasserhaushaltsfunktion abzielen sowie auf die Förderung der natürlichen Verjüngung. Im Hinblick auf die Sicherung der Wasserhaushaltsfunktion sind die empfohlenen Pflegemaßnahmen als Mindestpflege aufzufassen.

Dass Wälder auch ohne Pflege an einem Standort dauerhaft gedeihen können, muss nicht weiter betont werden. Die Eigenschaft, dass sie sich nahezu problemlos von selbst regenerieren, soll als Stärke dieses Vegetationstyps begriffen und berücksichtig werden. Denn ein einmal etablierter Wald wird auch ohne menschliches Zutun sehr lange Zeit bestehen bleiben und die ihm zugedachten Funktionen weitgehend erfüllen. Technische Komponenten, wie Kunststoffdichtungsbahnen, unterliegen der Alterung und damit einem fortschreitenden Verlust ihrer Funktionstüchtigkeit. Auf lange Sicht ist eine als Wasserhaushaltsschicht angelegte Rekultivierungsschicht zusammen mit einem gut entwickelten Bewuchs das bedeutsamste Element zur Minimierung des Sickerwasserzutritts in den Deponiekörper.

5.2 Gehölzpflege zur Optimierung der Wasserhaushaltsfunktion

Gestaltet man einen Deponiewald, so sind neben den Bodenverhältnissen der Waldzustand, d.h. Aufbau und Baumartenzusammensetzung und die Art und Weise, wie dieser Wald behandelt bzw. gepflegt wird, für die Abflussbildung unterhalb der Rekultivierungsschicht relevant. In Tabelle 3 sind einige Beziehungen zwischen der Abflussbildung und den Bodenverhältnissen und dem Waldzustand (oberer Teil) sowie der Abflussbildung unter Wald und der Waldbehandlung (unterer Teil) dargestellt.

Wälder mit einer auf natürlichen Standorten besonders hohen jährlichen realen Verdunstung sind mittelalte bis alte Laubbaumbestände mit der Hauptbaumart Stiel- oder Traubeneiche (*Quercus robur, Q. petraea*) und Nadelbaumbestände mit der Hauptbaumart Waldkiefer (*Pinus sylvestris*) und Fichte (*Picea abies*) (BRECHTEL & SCHEEL 1982). Es wird empfohlen, Deponiewälder in Anlehnung an diese Waldtypen entsprechend den in Tabelle 2 beschriebenen Entwicklungsschritten aufzubauen und zu gestalten. Die Mischung der genannten Baumarten mit weiteren, vor allem mittel- bis tiefwurzelnden Gehölzarten, wie Linde (*Tilia spec.*), Hainbuche (*Carpinus betulus*), Hasel (*Corylus avellana*) usw. trägt zur Steigerung der Transpiration bei.

Tabelle 3: Beziehungen zwischen der Abflussbildung unter Wald und Bodenverhältnissen, Waldzustand und Waldbehandlung. In Anlehnung an LÜSCHER & ZÜRCHER 2001 und BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996 aus BÖNECKE 2001.

Beziehungen zwischen Abflussbildung unter Wald und Bodenverhältnissen und Waldzustand	
Wasserhaushaltskomponente	**wird beeinflußt durch**
Interzeptionsverdunstung:	Baumart, Baumartenmischung, Schichtung, Deckungsgrad, Kronenform, Blattfläche, Streudecke
Infiltration:	Deckungsgrad Moosschicht, Humusform, Durchmischungstiefe org. Substanz, Bodenart
Speicherung/Zwischenabfluss:	Bodenart, Horizontfolge, Wassersättigung des Bodens, Hydromorphie, Skelettgehalt, Makroporen, Risse, Wurmgänge, Durchwurzelungsintensität, Durchwurzelungstiefe, Hangneigung
Transpiration:	Baumart, Baumartenmischung, Bestandesalter, Blattfläche, Durchwurzelungsintensität, Durchwurzelungstiefe
Abfluss:	Durchlässigkeit Untergrund, bevorzugte Fliesswege, Hangneigung
Beziehungen zwischen Abflussbildung unter Wald und Waldbehandlung	
Wasserhaushaltskomponente	**beeinflussbar durch forstliche Maßnahmen**
Interzeptionsverdunstung:	Baumartenwahl/-mischung, Bestandespflege
Infiltration:	Baumartenwahl/-mischung, bodenpflegliche Nutzung
Speicherung/Zwischenabfluss:	Baumartenwahl/-mischung, bodenpflegliche Nutzung
Transpiration:	Baumartenwahl/-mischung, Bestandespflege
Abfluss	-

Anfangs arbeitet man auf die gewünschte Baum- und Strauchartenmischung über Nachpflanzung und durch Übernahme von Naturverjüngung hin, später im Rahmen von Pflegeeingriffen durch Zurückdrängen bzw. Begünstigen von Arten. Um eine gut ausgeprägte Schichtung, d.h. ein stockwerkartiges Ineinandergreifen von Kronen kleiner, mittlerer, hoher und sehr hoher Bäume im Hinblick auf eine hohe Interzeptionsverdunstung zu erreichen, zielt die Jungwuchs- oder Läuterungspflege in jüngeren und mittelalten Beständen darauf ab, z.B. durch wiederholtes auf den Stock setzen einzelner Bäume eine Ungleichaltrigkeit und damit eine Ausdifferenzierung in kleine, mittlere und große Bäume herbeizuführen. Unter Berücksichtigung unterschiedlicher Ansprüche der Gehölzarten z.B. an Licht und Wärme, artspezifischer Wuchshöhen und -formen sowie von Vitalität, Lebensdauer usw., wird in älteren Beständen durch eine sog. „Plenterung“ die für den Deponiewald auf Dauer gewünschte Zusammensetzung und Struktur erhalten. Da bei einer Plenterung hauptsächlich ältere und großkronige Bäume entnommen werden, entstehen im Bestand Lücken, in denen sich Naturverjüngung ansiedeln kann, bzw. bereits vorhandener Jungwuchs die Chance hat weiter zu wachsen. Alle beschriebenen Maßnahmen stammen aus der regulären Waldbe-

wirtschaftung. Forstunternehmen, die mit ihrer Umsetzung vertraut sind, stehen praktisch überall zur Verfügung.

5.3 Wirtschaftliche Nutzung von Gehölzbeständen

Eine Nachnutzung von Gehölzbeständen auf Deponien unter gewinnbringenden Aspekten durchzuführen erscheint nicht möglich, dagegen schon eher unter dem Gesichtspunkt, Beiträge zur Kostendeckung zu erwirtschaften. Nennenswert sind in diesem Zusammenhang die Ergebnisse einer vom Bundesamt für Naturschutz geförderten Machbarkeitsstudie mit dem Ansatz, ehemalige Deponien als Standorte für die Produktion und Verwertung von Energiepflanzen unter Berücksichtigung naturschutzfachlicher Vorgaben zu nutzen (HILLEBRECHT et al. 2005). Ein zentrales Ergebnis ist: „Dass der Anbau von energetisch nutzbaren Pflanzen unter Beachtung von deponietechnischen Vorgaben und einer Reihe von naturschutzfachlichen Anforderungen grundsätzlich möglich ist. Allerdings reicht die Menge an Biomasse, die produziert werden kann (bezogen auf die auf einer Deponie dafür durchschnittlich geeigneten Fläche, Anm. d. Verfassers), im Regelfall nicht aus, um Anlagen wirtschaftlich zu betreiben, so dass aus diesem Grund Biomassepotenziale und Anlagenkapazitäten aus der Region eingebunden werden müssen.“ Zu den energetisch nutzbaren, schnell wachsenden Gehölzen gehören Weidenarten (*Salix spec.*), wie sie z.B. für die oben beschriebene ingenieurbiologische Bauweise verwendet werden. Es könnten z.B. die in größeren Weiden-Beständen (> 1 ha) bei der in 3 – 5jährigen Intervallen notwendigen Pflege anfallenden Äste einer energetischen Nutzung in Form von Hackschnitzeln zugeführt werden, um dadurch einen Beitrag zur Deckung der Gehölzpflegekosten zu erzielen.

Erfahrungen mit schnell wachsenden Baumarten liegen auch aus Versuchen zur alternativen Folgenutzung von Kippenstandorten vor (GRÜNEWALD et al. 2005). Dort wurden nach einem Agroforstsystem, dem Alley-Cropping (reihenweiser Anbau von schnell wachsenden Gehölzen, dazwischen Feldstreifen mit z.B. Grünlandnutzung) experimentelle Anbauten durchgeführt und ökologisch und ökonomisch bewertet. Der Ansatz scheint auf Deponien übertragbar und besonders für solche außerhalb Waldes interessant zu sein, wo aus landschaftlichen Gründen nur eine teilweise Begrünung mit Gehölzen in Frage kommt. Möglicherweise können mit dem System bestimmte gestalterische Anforderungen mit Anforderungen der nachhaltigen Sickerwasserminimierung in Einklang gebracht werden.

6 Fazit

Die Planung und Gestaltung von Gehölzbewuchs auf Deponien ist sicher nicht so anspruchsvoll wie die Lösung vieler technischer Fragen, die sich im Zusammenhang mit der Nachsorge- bzw. Nachnutzungsphase von Deponien stellen. Sie soll aber auch nicht so beiläufig erledigt werden, wie das in der Vergangenheit oft geschah und heute zum Teil noch der Fall ist.

Der Beitrag beschreibt, ausgehend von den Zielen und den Anforderungen an die Anlage eines Gehölzbewuchses auf Deponien, wie eine Planung für einen Gehölzbewuchs erstellt werden kann. Es wird erläutert, welche Begrünungsverfahren in Frage kommen und wie sich durch entsprechende Gestaltung bzw. Pflegeeingriffe ein Deponiewald entwickelt lässt, der

durch eine hohe reale jährliche Verdunstung zu einer Minimierung der Absickerung aus der Rekultivierungsschicht wirksam beiträgt.

Es wird dargestellt, wie wichtig es für die Planung eines Gehölzbewuchses ist, die lokalen Standortsverhältnisse zu kennen, das sind vor allem der Bodenzustand und das Klima. Nur unter Beachtung der Boden- und Klimaverhältnisse ist es möglich, eine Empfehlung abzugeben, aus welchen Baum- und Straucharten ein Gehölzbestand langfristig am erfolgreichsten entwickelt werden kann. Es sollte deshalb zur Regel werden, das beschriebene Verfahren zur Bewertung der Standortsverhältnisse, das Standortsgutachten, als Instrument des Qualitätsmanagements bei der Ausführung von Rekultivierungs- und Begrünungsarbeiten anzuwenden. Dadurch wäre weitgehend sichergestellt, dass bereits bei der Herstellung der Rekultivierungsschicht Belange des künftigen Bewuchses beachtet werden und die Zusammenstellung eines Bewuchses angepasst an die tatsächlichen Gegebenheiten eines Standorts erfolgt.

Die für einen Gehölzbewuchs auf Deponien beschriebenen Pflegemaßnahmen stammen aus der gängigen Waldbewirtschaftung. Entsprechend unkompliziert lässt sich deren Durchführung planen und organisieren. Die Pflegeeingriffe sind als eine Art Mindestpflege zu betrachten. Sie sind erforderlich, wenn ein Gehölzbewuchs in Form eines Deponiewaldes langfristig so bestehen bleiben soll, wie es für eine optimale Minimierung der Abgabe von Sicherwasser aus der Rekultivierungsschicht erforderlich ist.

7 Literatur

ALDINGER, E., SEEMANN, D. & KONNERT, V. (1996): Wurzeluntersuchungen auf Sturmwurfflächen 1990 in Baden-Württemberg. Mitt. Verein für Forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung, H. 38: 11-22

AG BODEN (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Aufl., 392 S., Hannover

AKS = Arbeitskreis Standortskartierung in der Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung (1996): Forstliche Standortsaufnahme, 352 S., Eching

BAUMGARTNER, A. & LIEBSCHER, H.-J. (1996): Allgemeine Hydrologie, Quantitative Hydrologie, Lehrbuch der Hydrologie, Band 1, 694 S.

BERGER, K & SOKOLLEK, V. (1997): Sind qualifizierte Abdeckungen von Altdeponien unter den gegebenen klimatischen Voraussetzungen der BRD sinnvoll bzw. möglich?, in EGLOFFSTEIN, T. & BURKHARDT, G. [Hrsg.]: Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Bd. 103: 15-40

BÖNECKE, G. (2000): Standortskundliche Untersuchungen bei Rekultivierungen, in Stein-Verlag Baden-Baden [Hrsg.]: Ratgeber Rekult: 54-55

BÖNECKE, G. (2001): Verzicht auf Oberflächenabdichtungen durch forstliche Rekultivierung von Deponien – Deponiewald statt Oberflächenabdichtung?, in EGLOFFSTEIN, T., BURKHARDT, G. & CZURDA, K. [Hrsg.]: Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Bd. 122: 263-280

BRECHTEL, H.M. & SCHEEL, G. (1982): Erwirtschaftung von Grundwasser durch Land- und Forstwirtschaftliche Maßnahmen. 4. Fortbildungslehrgang Grundwasser. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. [DVWK], Bonn

DGGT = Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (2000): GDA-Empfehlung E 2-31 – Rekultivierungsschichten (Entwurf), Bautechnik 77 (9): 617-626

GADOW VON, K. & MESKAUSKAS, E. (1997): Strichprobenverfahren zur Erfassung von Naturverjüngungen, AFZ/Der Wald: 247-248

GRÜNEWALD, H., WÖLLECKE, J., SCHNEIDER, B. U. & HÜTTL, R. F. (2005): Alley-Cropping als alternative Folgenutzung von Kippenstandorten. Natur und Landschaft (9/10): 440-443

HILLEBRECHT, K., RICHTER, O., KRATZ, R., BORKOWSKY, O., SCHMEHL, M. & FRICKE, K. (2005): Nachnutzung von Deponien für den Anbau von Energiepflanzen. Natur und Landschaft (9/10): 444-446

LANDESARBEITSKREISES FORSTLICHE REKULTIVIERUNG VON ABBAUSTÄTTEN (2000): Forstliche Rekultivierung. Schriftenreihe Umweltberatung im Industrieverband steine und Erden Baden-Württemberg e.V. (Hrsg.), Bd. 3, 62 S.

LfU = Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (Hrsg.), (1997): Forstwirtschaftliche Rekultivierung von Deponien mit TA Siedlungsabfall-konformer Oberflächenabdichtung, Handbuch Abfall, Bd. 13, 97 S u. Anhang.

LÜSCHER, P. & ZÜRCHER, K. (2001): Waldpflege zur Sicherung des vorbeugenden Hochwasserschutzes aus standortskundlicher Sicht, aufgezeigt an einem Beispiel der Schweiz. Vortrag: Symposium der Bayer. Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft: Vorbeugender Hochwasserschutz – Was können Wald und Forstwirtschaft beitragen?, 26.07.2001, Freising

MAIER-HARTH, U., BRÄCKELMANN, H. & STURM, D. (2005): Die Wasserhaushaltsschicht: Konzept und Durchführung am Beispiel der Hausmülldeponie Sprendlingen, Landkreis Mainz-Bingen, in Landesamt für Geologie und Bergbau & Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht (Hrsg.): 5. Deponieseminar – Sanierung, Oberflächenabdichtung, Rekultivierung und Nachsorge von Deponien: 75-113

RICHTER, F.-H., HORN, R., FLEIGE, H. & KHALIL, A. (2001): Bodenkundliche Bewertung einer temporären Oberflächenabdichtung. Wasser & Boden, (6): 17-20

SCHABER-SCHOOR, G. (2005): Ingenieurbiologischer Verbau, in WATTENDORF, P., KONOLD, W. & EHRMANN, O. (Hrsg.): Rekultivierungsschichten und Wurzelsperren, Culterra, Bd. 41: 155-168

WATTENDORF, P., KONOLD, W. & EHRMANN, O. (Hrsg.): Rekultivierungsschichten und Wurzelsperren, Culterra, Bd. 41, : 278 S.

WATTENDORF, P. & EHRMANN, O. (2003): Die Bedeutung von Wald für die langfristige Sicherheit von Deponien und Altlasten. Unveröff. Schlussbericht im Auftrag der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Freiburg, 24 S. u. Anhang

WATTENDORF, P. & SOKOLLEK, V. (2000): Gestaltung und Entwicklung von standortgerechtem Bewuchs auf Rekultivierungsschichten. In: Wasserhaushalt der Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien und Altlasten. Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, Bd. 47: 225-234

ZEH, H. (1993): Ingenieurbiologische Bauweisen. Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement und Bundesamt für Wasserwirtschaft (Hrsg.), Studienberichte Nr. 4, 60 S.

Erfahrungen beim Bau von Wasserhaushaltsschichten auf Deponien in Rheinland-Pfalz

Ulrich Maier-Harth, LGB Rheinland-Pfalz, Mainz

Inhalt

1 Einführung

Die günstigen lokalen Verhältnisse (Klima, Angebot von Rekultivierungsböden) führten bei Auftraggebern, Planern und Behörden in Rheinland-Pfalz zu den Überlegungen, von der ursprünglich genehmigten Kombinationsoberflächenabdichtung (Tondichtung + KDB) mit minimaler Rekultivierungsschicht abzuweichen und stattdessen eine KDB mit Wasserhaushaltsschicht inclusive optimierter Bepflanzung bzw. optimierte Rekultivierungsschichten vorzusehen, sofern die Gleichwertigkeit nachgewiesen wird.

Nachfolgend werden die Erfahrungen beim Einbau von optimierten Rekultivierungsschichten und von Wasserhaushaltsschichten auf den Kreismülldeponien Eisenberg, Meisenheim und Sprendlingen/Rhh. sowie der ehemaligen Industriemülldeponie Prael in Sprendlingen/Rhh. beschrieben.

2 Das Konzept der Wasserhaushaltsschicht

2.1 Funktion, Aufbau, Einbauempfehlungen und Bepflanzung

Werden die im Kap. 10.4.1.4 d) genannten Anforderungen (Verwendung von kulturfähigem Boden, Schutz der Dichtung, Minimierung der Infiltration von Niederschlagswasser, Anwendung von Wasserhaushaltsbetrachtungen) der TA Siedlungsabfall konsequent umgesetzt, sollte eine Rekultivierungsschicht im Wesentlichen folgende **Funktionen** erfüllen:

1. **Infiltrationsminimierung des Niederschlags** in das Entwässerungssystem bzw. auf die Kunststoffabdichtung durch Speicherung und Rückhaltung der Winter- und Starkniederschläge und Bereitstellung des pflanzenverfügbaren Wassers in der Hauptvegetationsperiode, d. h.
   - Maximierung der Verdunstung durch optimierte Speicherung pflanzenverfügbaren Wassers im Wurzelraum und
   - Reduzierung und Vergleichmäßigung der Dränspende, um die Entwässerungsschicht und die Vorfluter nicht zu überlasten.
2. **Pflanzenstandort**, d. h.
   - mechanischer Halt,
   - Wasserversorgung und
   - Nährstoffversorgung für die Pflanzen.
3. **Schutz der Oberflächenabdichtung und gegebenenfalls der Dränageschicht** vor schädlichen Einflüssen, d. h.
   - dem Einwachsen von Pflanzenwurzeln in das Dichtungs- und Entwässerungssystem vorbeugen,
   - Ausgleich von Wassergehaltsschwankungen, die zu wasserdurchlässigen Trockenrissen und Gefügebildungen führen,
   - Ausgleich von Temperaturschwankungen und Schutz vor UV-Bestrahlung,
   - ausreichend Raum für wühlende und röhrenbildende Bodentiere.

Im Gegensatz zu herkömmlichen Rekultivierungsschichten sieht die Wasserhaushaltsschicht eine standortangepasste Optimierung des Systems „Rekultivierungsschicht und Bewuchs“ vor, die von der langfristigen Wasserhaushaltsbetrachtung über die Auswahl der unter-

schiedlichen Böden incl. Berücksichtigung von eventuellen Recyclingmaterialien, Berechnung der erforderlichen Bodenmächtigkeit, die Gewinnungsverfahren, den Transport und eine eventuelle Aufbereitung der Böden, die Einbauverfahren, die Auswahl der optimierten Bepflanzung bis hin zur Bewässerung, Pflege und Nachsorge reicht.

Der **Aufbau** der Wasserhaushaltsschicht sieht in der Regel einen ca. 0,3 - 0,5 m mächtigen **Versickerungshorizont** (Oberboden) und einen ca. 1,5 m mächtigen **Wasserspeicherhorizont** (Unterboden) vor (Abbildung 1). Gegebenenfalls sind Modellrechnungen zur Bestimmung der Mächtigkeiten hilfreich.

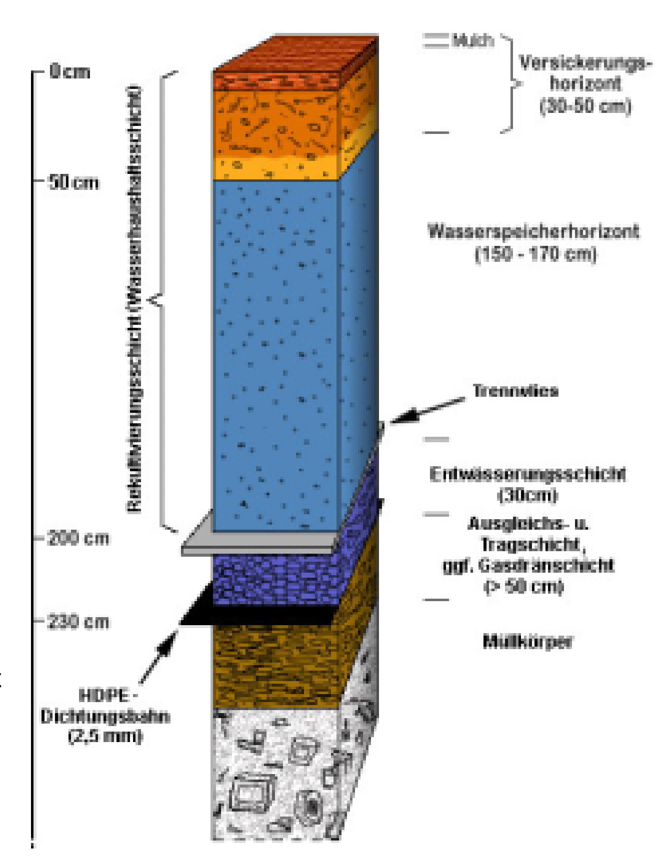


Abbildung 1: Aufbau eines Dichtsystems mit KDB und Wasserhaushaltsschicht in niederschlagsarmen Regionen bis ca. 650 mm/a (www.lgb-rlp.de)

Damit die Wasserhaushaltsschicht die vorgenannten Funktionen erfüllen kann, muss bei ihrem **Aufbau** folgendes berücksichtigt werden:

- ausreichende Mächtigkeit und Durchwurzelbarkeit,
- hohe nutzbare Feldkapazität (nFK) und ausreichende Luftkapazität,
- günstige Bodenreaktionen und ausreichende Verfügbarkeit von Pflanzennährstoffen,
- Beständigkeit gegen Erosion,
- ausreichendes Infiltrationsvermögen und Unempfindlichkeit gegen Verschlämmung,
- unverdichteter Einbau von möglichst schluffreichem Material im trockenen Zustand,
- optimale Funktion nur bei angepasster Bepflanzung.

Die bodenphysikalischen Eigenschaften der Böden hängen stark von der Einbautechnik ab. Folgende **Einbauempfehlungen** sind daher hilfreich:

- Für den Versickerungshorizont ist bei mittlerer Lagerungsdichte eine nFK von ca. 18 Vol.-% und eine Luftkapazität von mind. 10 Vol.-% anzustreben. Bodenarten wie Sl2, Sl3 und Sl4 (nach „Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage, 2005“) sind hierfür am besten geeignet. Kompost, gleichmäßig aufgebracht und untergefräst, verringert die Erosionsanfälligkeit, begünstigt die Humusbildung, erhöht die nutzbare Feldkapazität (nFK) und verbessert die Keimfähigkeit.
- Die nFK des Wasserspeicherhorizonts sollte bei ca. 20 Vol.-% und die Luftkapazität über 7 Vol.-% liegen (bei mittlerer Lagerungsdichte). Hierfür eignen sich die Bodenarten Slu, Su3, Su4, Uu, Uls, Us, Ut2, Ut3 und Ut4 (nach „Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage, 2005“).
- Vor dem Einbau der Böden ist eine Eignungsprüfung durchzuführen und ein Probefeld anzulegen, das so zu bemessen ist, dass die Einbaugeräte unter realitätsnahen Bedingungen eingesetzt werden können. Die fertig eingebauten Wasserhaushaltsschichten werden von Eigen-, Fremdüberwacher und gegebenenfalls der behördlichen Fremdüberwachung geprüft. Der Umfang der Kontrollparameter kann aus der Tabelle „Eignungs- und Kontrollprüfungen für Bodenmaterial in Deponie-Rekultivierungsschichten“ des Landesamtes für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB) entnommen werden (www.lgb-rlp.de).
- Für die Auswahl der Materialien werden die nachfolgenden Körnungsbänder des LGB empfohlen. Der Grobbodenanteil (Korndurchmesser > 2 mm) sollte unter 30 Gew.-% liegen. Steine mit einem Durchmesser > 10 cm sind auszusondern.

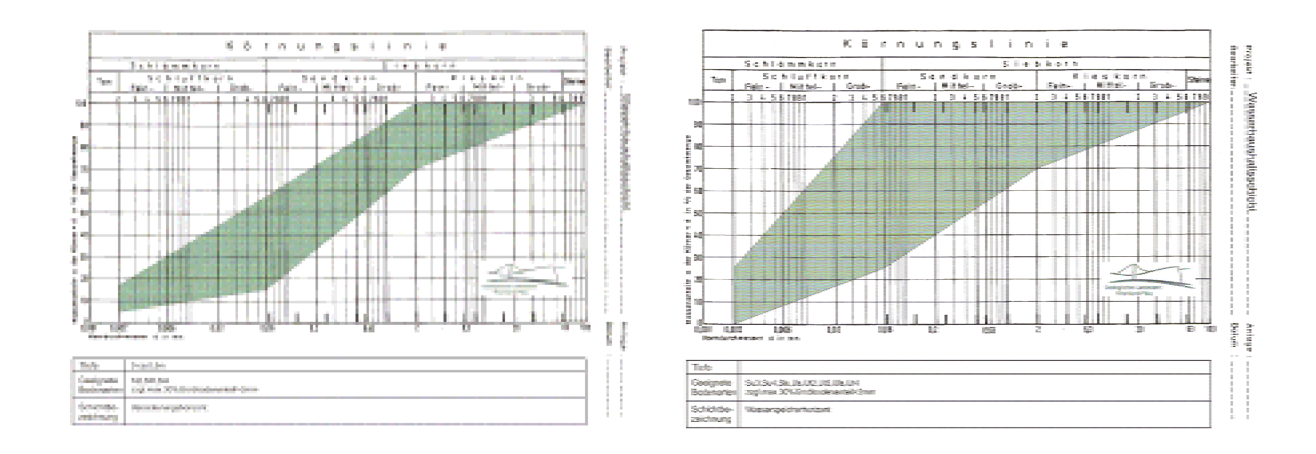


Abbildung 2: Die vom Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz vorgegebenen Körnungsbänder für Versickerungs- und Wasserspeicherhorizont

- Der Anteil an organischer Substanz sollte 10 Gew.-% nicht übersteigen und vor allem im Speicherhorizont wesentlich darunter liegen, um eine Bodenversauerung zu vermeiden. Eisensulfidhaltige und gipshaltige Böden sind ungeeignet.
- Ober- und Unterboden müssen getrennt gewonnen, gelagert und eingebaut werden.

- Bei der Bodengewinnung ist der Feuchtezustand bzw. die Konsistenz des Materials zu beachten. Nur Böden mit einer geeigneten „Mindestfestigkeit“ können schadlos umgelagert werden. Je trockener der Boden, desto stabiler ist sein Bodengefüge. Günstige Zeitpunkte für die Erdarbeiten sind daher vor allem die Sommer- und Herbstmonate. Anhaltspunkte für die Umlagerungseignung des Materials gibt Tabelle 1.

Tabelle 2: Umlagerungseignung (Mindestfestigkeit) von Böden in Abhängigkeit vom Feuchtezustand

Umlagerungs-eignung	**Feuchtezustand nicht bindiger und schwach bindiger Böden (< 17 % Ton)**	**Konsistenz* bindiger Böden (> 17 % Ton)**
optimal	trocken (staubig) bis schwach feucht (Probe wird bei Wasserzugabe dunkler)	halbfest
tolerierbar	feucht (Finger werden etwas feucht, Probe wird bei Wasserzugabe nicht dunkler)	steifplastisch
unzulässig	stark feucht (Wasseraustritt beim Klopfen) bis nass (Boden zerfließt)	weich bis breiig

* Ermittlung der Konsistenz nach „Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage“ (Tab. 17, S. 115) durch einfache Feldansprache

- Das Material sollte dabei von steifer bis halbfester Konsistenz sein. Andernfalls muss es ausgebreitet und getrocknet werden. Der Einbau im Winter und während Regenereignissen ist nicht zulässig. War z. B. aus Witterungsgründen ein Materialeinbau nur mit Überverdichtung möglich, so sind anschließend geeignete Tiefenlockerungsmaßnahmen durchzuführen.
- Lagenweiser Einbau ist zu unterlassen, um Stauhorizonte zu vermeiden. Deshalb empfiehlt sich der Einbau mit Langarm- bzw. Teleskopbaggern oder Vor-Kopf-Einbau mit leichten Moorraupen (max. Bodenpressung < 15 kPa).
- Baustraßen müssen in Überstärke hergestellt und später wieder abgetragen werden. Sinnvollerweise werden Baustraßen dort angelegt, wo später Versorgungswege verlaufen.
- Bei der Bepflanzung ist auf langlebige Bepflanzung mit hoher Interzeptionsleistung zu achten. Tiefwurzler (zu denen beispielsweise auch Leguminosen, Kräuter der Trockenrasengesellschaften und einige Arten der Ruderalflora gehören) sind zu vermeiden. Am besten geeignet ist eine Waldbepflanzung, bestehend aus Büschen und Bäumen, die ein mehrstufiges Blätterdach aufweisen und die gesamte Bodenschichtmächtigkeit mit Wurzeln erfüllen. Ein hoher immergrüner Anteil vor allem an Nadelbäumen trägt zu einer ganzjährigen Minimierung der Grundwasserneubildung bei. Bäume mit Pfahlwurzeln oder hoher Wurzelenergie sind zu vermeiden.
- Weitere Hinweise und Empfehlungen sind den GDA-Empfehlungen E 2-30 (Modellierung des Wasserhaushalts der Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien), E 2-31 (Rekultivierungsschichten, Entwurf), E 2-32 (Gestaltung des Bewuchses auf Abfalldeponien, Entwurf), MELCHIOR (2001b) und MELCHIOR & CLAUSSEN (2005) zu entnehmen.

3 Kreismülldeponie Eisenberg

3.1 Vorbemerkungen

Die Kreismülldeponie Eisenberg liegt südwestlich der gleichnamigen Ortschaft Eisenberg in der Vorderpfalz, ca. 15 km südöstlich von Kirchheimbolanden. Die mittlere Niederschlagssumme liegt in dieser Region bei ca. 600 mm/a.

Die Grundfläche des Deponiekörpers beträgt ca. 5,5 ha. Im Fußbereich der Deponieböschungen erfolgte bereits 1989 eine Abdeckung mit einer mineralischen Oberflächenabdichtung, Rekultivierungsschicht und Begrünung. Auf der Restfläche von ca. 2,75 ha wurde im Jahre 2000 eine Kunststoffdichtungsbahn (KDB) mit einer darüber lagernden Rekultivierungsschicht mit Wasserhaushaltsfunktion (Wasserhaushaltsschicht) aufgebracht.

Die nachfolgenden Erfahrungen basieren auf den Untersuchungsergebnissen des Fremdüberwachers (FEIN 2001) und der behördlichen Fremdüberwachung des Geologischen Landesamtes Rheinland-Pfalz (WOURTSAKIS & MAIER-HARTH 2001).

3.2 Aufbau der Rekultivierungsschicht

Die 1,50 m mächtige Rekultivierungsschicht besteht aus zwei Schichten, dem Oberboden mit 0,30 m und dem Unterboden mit 1,20 m Mächtigkeit.

Der Oberboden besteht aus sehr schwach bis schwach humosem, carbonatreichem, lehmigem Lössmaterial, welches einer Baumaßnahme im benachbarten Wattenheim entstammt.

Das für den Unterboden verwendete Klebsand-Material, das mit Planierraupen in zwei Lagen mit jeweils 0,60 m Mächtigkeit eingebaut wurde, entstammt der Abraumhalde der benachbarten Eisenberger Klebsandwerke (EKW). Aus Standsicherheitsgründen empfahl der Gutachter, auf dem 1 : 3 geneigten Böschungsbereich die untere Lage mit einer Vibrationsschaffußwalze leicht zu verdichten. Damit sollte ein fester Verbund mit dem unterlagernden Trennvlies hergestellt und ein Abgleiten des Klebsandes verhindert werden.

3.3 Entnahme der Bodenproben

Zur Charakterisierung des Einbauzustandes der Rekultivierungsschicht wurden zwei bis drei Wochen nach dem Einbau und vor der endgültigen Fertigstellung des Oberbodens (Einfräsen des Kompostes) drei Schürfgruben angelegt und aus den verschiedenen Materialschichten und Lagen (0 – 0,3 m, 0,3 – 0,9 m, 0,9 – 1,5 m) Proben in gestörter und ungestörter Lagerung entnommen und nach Standardverfahren untersucht. Aus der untersten Lage des Unterbodens der Schürfgruben 2 und 3 wurden für die bodenphysikalischen Untersuchungen Proben sowohl aus dem oberen Bereich (0,90 – 1,20 m Tiefe) als auch aus dem unteren Bereich (1,20 – 1,50 m Tiefe) entnommen.

Die Klassifizierung der Bodeneigenschaften erfolgte nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA 4; AG Boden 1996).

3.4 Untersuchungsergebnisse

Das carbonat- und schluffreiche Material des Oberbodens (Abbildung 3) entspricht in seiner Textur nicht den Anforderungen des Qualitätssicherungsplanes. Seine nutzbare Feldkapazität ist zwar, bedingt durch den hohen Schluffgehalt, hoch (19,6 – 21,4 Vol.-%), hat jedoch eine geringe Gefügestabilität. Es verschlämmt, verkrustet und verdichtet sich leicht beim Aufschlag der Regentropfen; in Hanglage ist eine erhöhte Erosionsgefährdung die Folge.

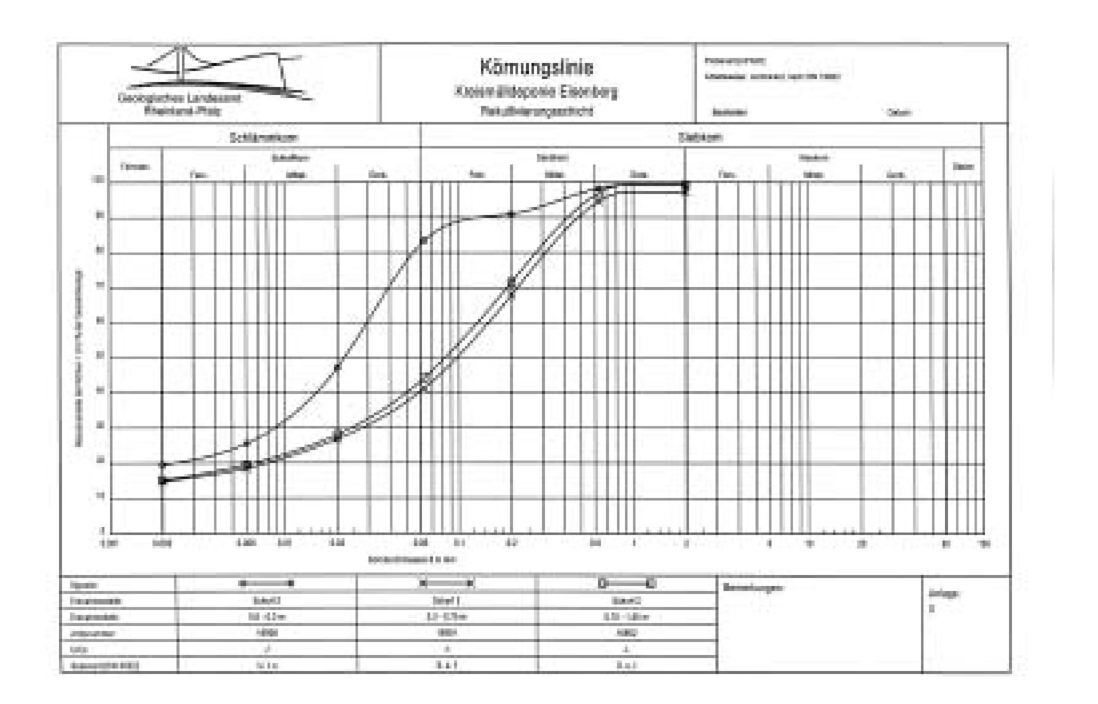


Abbildung 3: Kornsummenkurve Schurf 2

Der **Unterboden** war, von 2 Tiefenbereichen abgesehen, stark verdichtet und hatte deshalb folgende Eigenschaften:

- Zu hohe Rohdichte (1,6 – 2,0 g/cm³) und effektive Lagerungsdichte (1,8 – 2,1 g/cm³)
- Zu geringes Porenvolumen (25,8 – 40,0 Vol.-%)
- Zu wenig luftführende Grobporen (Luftkapazität: 3,6 – 16,3 Vol.-%)
- Zu geringe Wasserdurchlässigkeit (9,1 x 10-6 – 8,1 x 10-7 m/s).

Die nutzbare Feldkapazität des Oberbodens (19,6 – 21,4 Vol.-%) lag geringfügig über, die des Unterbodens (10,5 – 15,8 Vol.-%) um ein Drittel unter den Mindestanforderungen nach dem Qualitätssicherungsplan.

Hohe Rohdichten, geringe Porenvolumina in Verbindung mit Luftkapazitätswerten, die z.T. weit unter 5 Vol.-% lagen, können die Durchwurzelungsdichte und -tiefe behindern und damit die nutzbare Feldkapazität des potentiellen Wurzelraumes begrenzen.

Der dichte **Oberboden** konnte durch die Einarbeitung des Kompostes innerhalb kurzer Zeit eine deutliche Auflockerung erfahren.

Die in den vorgenannten Untersuchungen ermittelten hohen Verdichtungen des **Unterbodens** ließen jedoch befürchten, dass diese Schichten die ihnen zugedachte Aufgabe als Wasserspeicher und Pflanzenstandort langfristig nicht erfüllen werden.

Im Plateaubereich empfahl das LGB daher eine maschinelle Tieflockerung, die allerdings erst nach Abtrocknen der Bodenschichten bis zur Lockerungstiefe durchgeführt werden konnte. Der Unterboden weist nun bis zu dieser Tiefe eine lockere Struktur auf und die Rohdichte nahm von ursprünglich über 1,9 g/cm³ auf ca. 1,6 g/cm³ ab. Porenvolumen und Luftkapazität haben dadurch eine deutliche Erhöhung erfahren.

3.5 Empfehlungen

Um eine Wiederverdichtung des aufgelockerten Bodens zu vermeiden, sollte das Befahren mit schweren Fahrzeugen (auch bei Pflanz- und Mäharbeiten) unterlassen werden.

Die Gefahr des Abgleitens überlagernder Schichten auf einbaubedingten Stauhorizonten in den Böschungsbereichen lässt sich minimieren, indem dort tieferwurzelnde langlebige Bäume und Büsche angepflanzt werden, deren Wurzeln die durchlässigen und geringdurchlässigen Schichten auf natürliche Weise miteinander “vernageln”.

3.6 Abschließende Bewertung

Aus bodenphysikalischer Sicht hat sich der schwach verdichtete Einbau von Klebsand nicht bewährt. Aufgrund seiner Gleichkörnigkeit neigt das Material zum Verschlämmen. Die zahlreichen Niederschlagsereignisse während der Einbauphase erschwerten den Einbau relativ trockenen Bodens. Dadurch kam es trotz langer Stillstandszeiten zu unerwünschten Verdichtungen, insbesondere im Bereich der Baustraßen.

Rutschungen wurden bis heute nicht beobachtet.

Bei den angepflanzten Gehölzen kam es vor allem auf der Südböschung zu starken Ausfällen infolge Trockenheit, Fege- und Verbissschäden. Abhilfe sollen Gehölzinseln mit intensiverer Bewässerung und verbessertem Schutz gegen Wildschäden bringen.

4 Kreismülldeponie Meisenheim

4.1 Vorbemerkungen

Die Deponie Meisenheim liegt im Kreis Bad Kreuznach etwa 1,5 km nordöstlich von Meisenheim. Der mittlere Jahresniederschlag beträgt 550 bis 600 mm. Den Untergrund der Deponie bilden wechselgelagerte Gesteine (Sand-, Ton- und Siltsteine) des Unterrotliegend. Es dominieren flach- bis mittelgründige und skelettreiche Böden, die eine geringe Wasserspeicherfähigkeit im durchwurzelbaren Boden aufweisen. Diese so genannten Regosole sind aus lösslehmarmen bis -haltigen Solifluktionsdecken entstanden. In der Aue des Reiffelbaches sind tiefgründige und humose Kolluvisole bzw. Auenböden (Holozän) mit einer hohen bis sehr hohen Wasserspeicherfähigkeit im durchwurzelbaren Bodenraum verbreitet.

Im Rahmen der Rekultivierung der Hausmülldeponie Meisenheim durch den Abfallwirtschaftsbetrieb des Landkreises Bad Kreuznach wurde der Altmüllkörper im Sommer 2002 durch die Herstellung eines Oberflächenabdichtungssystems gesichert. Die Struktur- und

Genehmigungsdirektion Koblenz (SGD Nord) forderte für die Altdeponie im Böschungs- und Plateaubereich eine Wasserhaushaltsschicht als Rekultivierungsschicht und im Plateaubereich zusätzlich eine KDB-Abdichtung.

Dabei musste auf das örtlich vorhandene, z.T. extrem ungeeignete Bodenmaterial zurückgegriffen werden, für das keine Einbauerfahrung vorlag. Die Anforderungen hinsichtlich Mischungsverhältnis und Einbaumethoden bzw. -kennwerten ergaben sich somit erst durch Eignungsversuche, Testfelder und den aktuellen Bauablauf. Die Flexibilität und Kreativität aller Beteiligten ließ trotz widriger Bedingungen eine voll funktionsfähige Wasserhaushaltsschicht entstehen, die den Forderungen der Genehmigungsbehörde entspricht.

Das Landesamt für Geologie und Bergbau war während der gesamten Planungs- und Bauphase beratend und abschließend als behördlicher Fremdüberwacher für die Qualität der Wasserhaushaltsschicht tätig.

4.2 Aufbau der Wasserhaushaltsschicht

Im Plateaubereich im nördlichen Teil der Deponie wurde über einer Ausgleichs- und Entgasungsschicht aus Split und einem darüber liegenden Schutzvlies eine Kunststoffdichtungsbahn (KDB) eingebaut (Abbildung 4). Darüber folgt ein Schutzvlies, eine 30 cm mächtige Kiesdränage aus Split (8/16 mm) und ein Trennvlies.

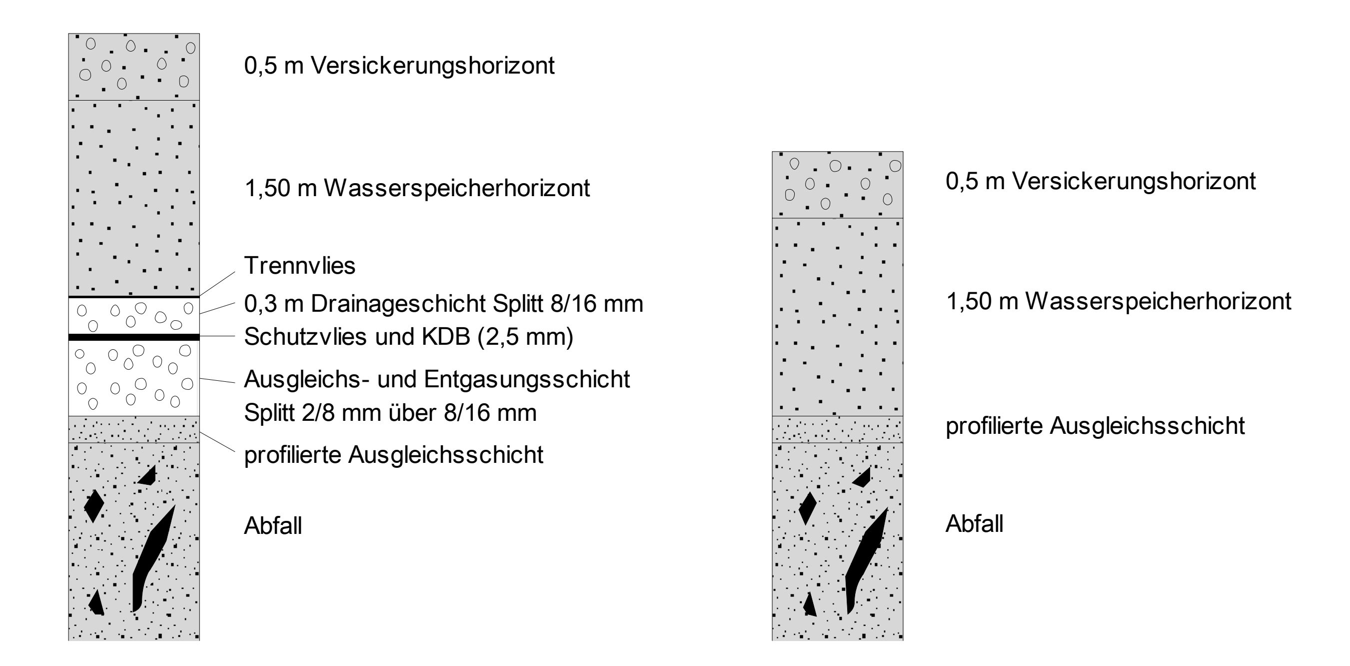


Abbildung 4: Aufbau der Abdichtungssysteme im Plateau- und Böschungsbereich

Im gesamten Böschungsbereich wurde auf Dichtungselemente verzichtet. Stattdessen sollte die Wasserhaushaltsschicht eine besonders hohe nutzbare Feldkapazität (nFK) aufweisen.

Der für die Wasserhaushaltsschicht verwendete Boden entstammt einerseits der Aue des Reiffelbaches unterhalb der Deponie südlich der B 420 ("Auenmaterial"), andererseits der

nordöstlich der Deponie gelegenen sog. "Schneider-Halde" ("Solifluktionsmaterial"). Während es sich bei dem so genannten Auenmaterial um einen homogenen Lehm- bis Tonschluff handelt, ist das Solifluktionsmaterial ein stark inhomogenes gemischt-grobkörniges Substrat, das 1992/93 beim Bau des jüngsten Deponieabschnittes „Nord“ abgeschoben und auf Halde gesetzt wurde. Beide Substrate wurden im Vorfeld der Rekultivierung auf ihre Bodeneigenschaften hin untersucht.

Das für den Speicherhorizont vorgesehene Auenmaterial war nicht in ausreichender Menge vorhanden und sollte daher aus Kostengründen mit dem Solifluktionsmaterial verschnitten werden. Um das geeignete Mischungsverhältnis zu ermitteln, erfolgten im Rahmen eines Qualitätssicherungsplans in einer ersten Phase die Eignungsprüfungen für die vorgesehenen Bodenmaterialien der Rekultivierung. Anschließend wurden Probefelder mit 3 verschiedenen Mischungsverhältnissen hergestellt und aus bodenkundlicher Sicht bewertet (PUSCH, H., Y. HAMAD & J. WEIß, 2002; VICK, R., 2001). Das Mischungsverhältnis 1 : 3 (Auenmaterial : Solifluktionsmaterial) erbrachte unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit die besten bodenphysikalischen Eigenschaften.

Tabelle 2: Aufbau der Rekultivierungsschicht

Horizont	Plateaubereich	steilerer Böschungsbereich	flacherer Böschungsbereich
Versickerungshorizont			
Mächtigkeit	0,5 m	0,5 m	0,5 m
Auf- und Einbau	Solifluktionsmaterial einlagig, Vor-Kopf-Einbau	Solifluktionsmateri-aleinlagig, Vor-Kopf-Einbau	Solifluktionsmateri-aleinlagig, Vor-Kopf-Einbau
Wasserspeicherhorizont			
Mächtigkeit	1,5 m	1,5 m	0,5 m
Auf- und Einbau	0,3 m Schutzschicht (Solifluktionsmaterial) 3 x (0,1 m Auenmaterial + 0,3 m Solifluktionsmaterial), dreilagig, 3 Fräsgänge jeweils bis 0,5 m	Auenmaterial, sechslagig, unverdichtet	Auenmaterial, zweilagig, unverdichtet

Um die Versickerung zu optimieren und die Erosionsanfälligkeit zu minimieren, wurde generell im gesamten Deponiebereich das Solifluktionsmaterial als Versickerungsschicht eingebaut (Tabelle 2). Das Auenmaterial besitzt zwar ideale Wasserspeichereigenschaften und war deshalb für die gesamte Wasserspeicherschicht favorisiert worden, stand jedoch nicht in ausreichender Menge zur Verfügung und wurde deshalb im Plateaubereich mit Solifluktionsmaterial gemischt.

Im Sommer 2002 wurden im Anschluss an den Einbau der Rekultivierungsschicht 10 cm Kompost von den Bermenwegen aus mit einem Spezialstreuer mit Seitenaustrag aufgebracht und mit einer Kreiselegge mit Spezialbereifung zur Minimierung des Bodendrucks in die Rekultivierungsschicht eingearbeitet. Dadurch wird die Erosionsanfälligkeit weiter ver-

ringert, die Humusbildung begünstigt, die nutzbare Feldkapazität (nFK) erhöht und die Keimfähigkeit verbessert.

4.3 Entnahme der Bodenproben

Im Juli 2002 beprobte das Landesamt für Geologie und Bergbau sechs Schürfe. Die Schürfe S1 bis S3 wurden im etwa 2,8 ha großen nördlichen Plateaubereich, die Schürfe S4 und S5 im steileren Böschungsbereich sowie der Schurf S6 im südlichen flacheren Böschungsbereich. Die Entnahme der Stechzylinder erfolgte vor der Einfräsung des Kompostes.

Die Proben zur Charakterisierung des Einbauzustandes der Rekultivierungsschicht wurden aus den verschiedenen Tiefenstufen (in der Regel 0 - 0,5 m, 0,5 - 0,9 m, 0,9 - 1,3 m und 1,3 - 1,9 m) in gestörter und ungestörter Lagerung entnommen und nach Standardverfahren untersucht.

4.4 Untersuchungsergebnisse

Von wenigen Ausnahmen abgesehen erfüllte die Rekultivierungsschicht der Deponie Meisenheim die Vorgaben des Qualitätsplans. Die Böden weisen einen potenziellen Wurzelraum im Unterboden (Wasserspeicherhorizont) zwischen 170 und 185 cm und eine auf diesen Wurzelraum bezogene nutzbare Feldkapazität zwischen 300 und 350 mm (= sehr hoch) auf. Lediglich Schurf 1 (flacherer Böschungsbereich) verfügt über einen Wurzelraum von 120 cm, die nutzbare Feldkapazität ist mit 231 mm dennoch als hoch einzustufen Es lagen keine Bodenverdichtungen vor. Das Porenvolumen und die Luftkapazität (5,0 – 15,7 Vol.-%) waren in der Regel günstig. Die bodenchemischen Kennwerte waren in allen Schichten hinsichtlich einer zukünftigen Gefügebildung und eines zukünftigen Pflanzenwachstums als positiv zu bezeichnen.

Im Juni 2005 wurde im Umfeld der Schürfe 1, 3 und 5 erneut Schürfgruben bis in 1,50 m Bodentiefe angelegt (MAIER-HARTH & SAUER 2005), um das Bodengefüge anzusprechen (Schurf 1 neu, Schurf 3 neu, Schurf 5 neu). Erfasst wurde die Packungsdichte (PD) als der mit gefügekundlichen Feldmethoden ermittelte Grad der Kompaktheit bzw. Lockerheit eines Bodenhorizontes (DIN 19682-10). Die Packungsdichte wird in fünf Stufen angesprochen (PD 1 = sehr gering, PD 3 = mittel, PD 5 = sehr hoch). Ab Packungsdichte 4 gilt ein Boden als lockerungsbedürftig, die Durchwurzelbarkeit ist eingeschränkt. Weiterhin wurde ein besonderes Augenmerk auf die tatsächliche Durchwurzelung gelegt, die nach AG BODEN (2005) klassifiziert wurde.

Die Abbildung 5 fasst die Ergebnisse der Geländebefunde zusammen.

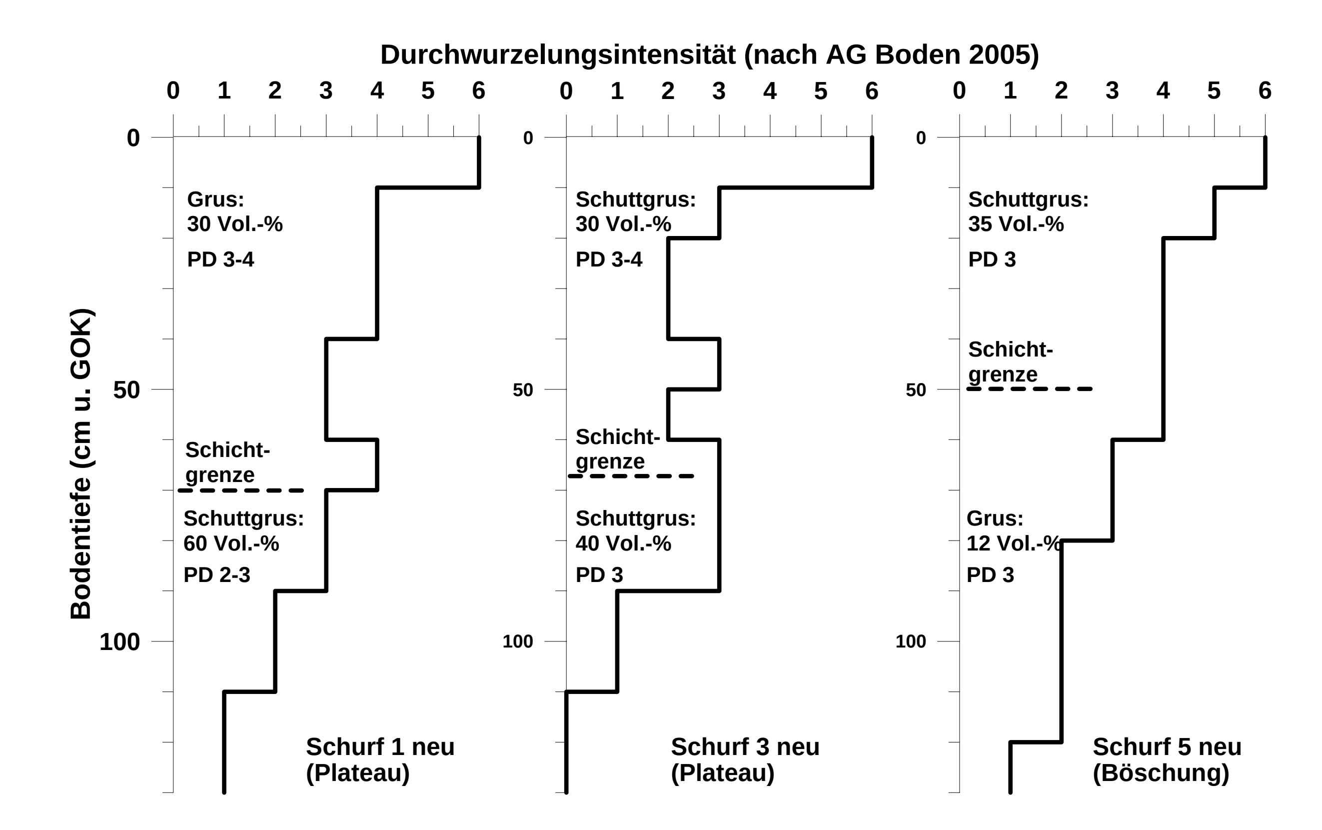


Abbildung 5: Tiefenverteilung der in den Schürfen 1 neu, 3 neu und 5 neu aufgenommenen Durchwurzelungsintensitäten (Schichtgrenze = Grenze zwischen Versickerungs- und Wasserhaushaltsschicht, PD = Packungsdichte. Weiterhin Angabe der Grobbodenartuntergruppe mit geschätztem Skelettgehalt > 2 mm)

Schurf 5 neu zeigt den Idealfall der stetigen Abnahme der Durchwurzelungsintensität mit der Tiefe, so wie es auch auf natürlichen Böden zu erwarten ist. Auf den beiden übrigen Standorten gibt es zwar gewisse Sprünge in der Tiefe, alle Standorte sind aber nach einer Bestockungszeit von etwa 2,5 Jahren bereits bis unterhalb von 100 cm Bodentiefe durchwurzelt, obwohl der Skelettgehalt partiell bei bis zu 60 Vol.-% im Unterboden liegt.

4.5 Empfehlungen

Zusammenfassend ergeben sich aus den auf der Deponie Meisenheim gemachten Erfahrungen folgende Empfehlungen:

- Skelettreiche Böden können als Rekultivierungs- bzw. Wasserhaushaltsschicht eingesetzt werden, wenn sie, mit schluffreichem Material vermischt, locker eingebaut werden sowie ausreichend mächtig sind (je nach Zusammensetzung mindestens 1,5 - 2 m).
- Skeletthaltige Böden reduzieren Erosion in Böschungsbereichen und Verdichtung durch Überfahrung.
- Vor der Materialsuche für die Rekultivierungsschicht sollte anhand eines Körnungsbandes der Spielraum für geeignete Materialien aufgezeigt werden. Dabei ist zu beachten, dass die bodenkundliche Nomenklatur nur Korngrößen bis 2 mm berücksichtigt. Für den Grobbodenanteil ist ein separates Anforderungsprofil zu erstellen (z.B. Anteil max. 30 Gew.-%, max. Kantenlänge 10 cm).

- Die Bildung von Stauhorizonten lässt sich vermeiden und damit die Gefahr von Rutschungen verringern, wenn gerade im Böschungsbereich die Rekultivierungsböden mit dem Langarmbagger oder mit leichten Moorraupen im Vorkopfeinbau aufgebracht werden. Der lagenweise Einbau mit Planierraupen schafft Verdichtungshorizonte, die nur schwer wieder zu beseitigen sind und Schäden verursachen können.
- Werden zur Herstellung von Mischböden unterschiedliche Böden in-situ lagenweise aufgebracht, sollte zwecks ausreichender Verzahnung und zur Verhinderung von Verdichtungshorizonten mindestens 10 cm in die unterlagernde Schicht gefräst werden.
- Kompost, gleichmäßig aufgebracht und untergefräst, verringert die Erosionsanfälligkeit, begünstigt die Humusbildung, erhöht die nutzbare Feldkapazität (nFK) und verbessert die Keimfähigkeit.
- Mit einer sofortigen Graseinsaat wird die Erosion weiter verringert und die Ausbreitung von Disteln und anderen Unkräutern minimiert.
- Wird die Mahd mindestens zweimal, besser dreimal jährlich durchgeführt und die Gehölze freigestellt, kann die junge Gehölzpflanzung besser bewässert und die Ausbreitung von Unkräutern und Wühlmäusen zum Vorteil der Anpflanzungen eingeschränkt werden.
- Jungpflanzen sind in den ersten Jahren zu wässern, da ihre Wurzeln noch nicht in den immerfeuchten Bodenbereich reichen.
- Der lockere Einbau von Böden mit guter Wasserspeicherfähigkeit in Verbindung mit einer optimierten Bepflanzung reduziert den Sickerwasseranfall so erheblich, dass Kosten für aufwändige Abflusskanäle und Rückhaltebecken in vielen Fällen eingespart werden können.
- Die rechtzeitige Ausschau nach geeigneten Rekultivierungsböden und die frühzeitige Einbeziehung eines Feldbodenkundlers mit bodenphysikalischen Kenntnissen öffnet die Möglichkeit, beim Bau der Rekultivierungsschicht kostengünstig ein optimales Ergebnis zu erzielen.

4.6 Abschließende Bewertung

Im Falle der vorliegenden Deponie ist davon auszugehen, dass die positiv bewerteten bodenchemischen Eigenschaften der Rekultivierungsschicht eine gute Voraussetzung für hohe biologische Aktivität und gute Mineralisierungsbedingungen bilden. Auch wenn Einzelwerte der bodenphysikalischen Untersuchungen die Anforderungen der Planungsvorgaben nicht erreichten, wird die Rekultivierungsschicht großflächig ihre Funktionen erfüllen.

Die Untersuchungsergebnisse belegen, dass durch die Mischung unterschiedlicher, zum Teil auch ungeeigneter natürlicher Substrate eine funktionsfähige Rekultivierungsschicht hergestellt werden kann, wenn auf der anderen Seite große Mengen eines schluffreichen Substrates zur Verfügung stehen. Auch hohe Grobbodenanteile sind bei einer Rekultivierungsschichtmächtigkeit von 2 Metern unbedenklich, da die Wasserversorgung der Vegetation - unbegrenzte Durchwurzelbarkeit und das Fehlen von Verdichtungen vorausgesetzt - über eine ausreichend hohe nutzbare Feldkapazität sichergestellt wird. Darüber hinaus wird durch den Grobbodenanteil die Kompaktionsgefahr vor allem von feuchten Böden reduziert und die Erosion verringert.

Voraussetzung hierfür ist jedoch der unverdichtete Einbau im trockenen Zustand und die Herstellung einer guten Verzahnung zwischen unterschiedlichen Schichten ohne Bildung von Stauhorizonten, wie es vor allem der Einbau mit Langarmbaggern möglich macht.

Trotzdem kam es Ende 2002 im östlichen Bereich der Böschung oberhalb des 1. Bermenwegs zu einem leichten Abgleiten oberflächennaher z.T. wassergesättigter Schichten. Bei Aufgrabungen konnte in 50 cm Tiefe eine bereichsweise dichter gelagerte Einbauschicht ermittelt werden, die als Sperrschicht wirkte und zu einer Aufsättigung der überlagernden Bodenschichten führte. Die Böschung wurde inzwischen mit Winkelsteinen stabilisiert.
Im Plateaubereich mit Ruderalflora sind erhebliche Ausfälle an Weichselkirschen durch Insektenfraß und Wühlmausschäden an Obsthochstämmen zu beobachten. Im Böschungsbereich, wo häufiger gemäht wird, gab es kaum Vegetationsschäden. Lediglich ein paar vertrocknete Kiefernpflänzchen mussten ersetzt werden.

5 Kreismülldeponie Sprendlingen/Rhh.

5.1 Vorbemerkungen

Die an der westlichen Hangkante (260 m ü. NN) des Rheinhessischen Tafel- und Hügellandes gelegene Kreismülldeponie des Abfallwirtschaftsbetrieb des Landkreises Mainz-Bingen befindet sich in einer ehemaligen Sand- und Kiesgrube zwischen den Ortschaften Oberhilbersheim und Sprendlingen, ca. 25 km südwestlich von Mainz.

Die Kreismülldeponie befindet sich in einer Zone feucht-gemäßigten Klimas. Der maritime Einfluss ist vor allem durch die nördlich und westlich angrenzenden Mittelgebirge deutlich abgeschwächt. Die Niederschlagshöhe des Sommerhalbjahres (Mai - Oktober) übertrifft im allgemeinen die des Winterhalbjahres. Für den vorgenannten Zeitraum liegen in Sprendlingen die mittleren Niederschlagshöhen im Sommerhalbjahr zwischen 276 und 300 mm, im Winterhalbjahr unter 176 mm (MINISTERIUM FÜR UMWELT UND FORSTEN, 1998).

Auf dem profilierten Deponiekörper des Altabschnitts I ist in den Jahren 2002 bis 2004 nach vorangegangenen Wasserhaushaltsberechnungen ein Oberflächenabdichtungssystem mit KDB und Wasserhaushaltsschicht aufgebaut worden.

Der etwa 6 ha große Plateaubereich weist geringe Neigungen von ca. 1 : 20 bis etwa 1 : 7 auf. Die zunächst mit Neigungen von 1 : 3 geplanten Böschungen am südlichen und südwestlichen Rand der Deponie wurden nach fortgeschriebener Planung mit Neigungen von maximal 1 : 4,5 hergestellt (Abbildung 6). Die größten Böschungslängen betragen in den steilen Böschungsabschnitten etwa 40 m.

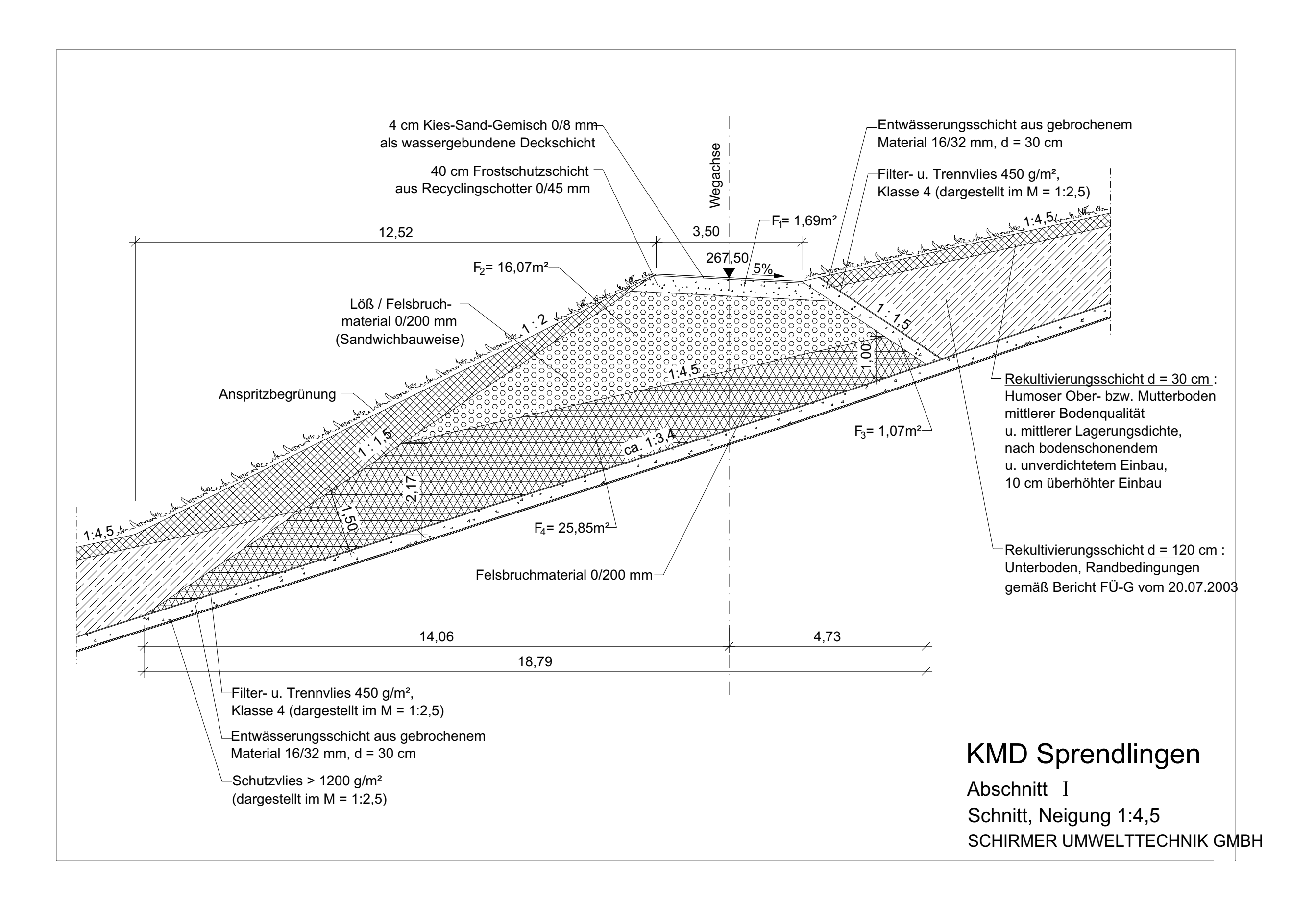


Abbildung 6: Regelaufbau im Bereich der Bermenwege

5.2 Aufbau der Wasserhaushaltsschicht

Das Oberflächenabdichtungssystem wurde mit folgendem Regelaufbau (dargestellt von unten nach oben) hergestellt:

- 15 cm mineralische Schutz- und Auflagerschicht
- Kunststoffdichtungsbahn aus PE-HD, d = 2,5 mm, beidseitig profiliert (sandrauh)
- geotextiles Schutzvlies aus PE-HD, g ≥ 1.200 g/m²
- 30 cm Flächendränage 16/32 mm
- Trennvlies, g = 450 g/m²
- 1,2 m Unterboden der Wasserhaushaltsschicht
- 0,3 m Oberboden der Wasserhaushaltsschicht (überhöhter Einbau 0,4 m).

5.2.1 Unterboden der Wasserhaushaltsschicht

Für den Unterboden der Wasserhaushaltsschicht kamen Überlagerungsböden (Löss) aus den benachbarten Sandgruben zum Einsatz.

Nachfolgend sind die Anforderungen an den Unterboden gemäß des projektspezifischen Qualitätssicherungsplans (QSP) aufgeführt:

• Bodenart:	Sl4 (stark lehmiger Sand)
• Feinbodenanteil (d < 2 mm):	≥ 70 Gew.-%
• Zulässige Kornfraktionen des Feinbodens:	Ton 12 bis 17 % Schluff 10 bis 40 % Sand 43 bis 78 %
• Grobbodenanteil (d ≥ 2 mm):	< 30 Gew.-%
• Größtkornabmessung:	< 10 cm (Kantenlänge bzw. Durchmesser)
• Humusgehalt:	0 %
• Boden frei von:	Eisensulfid
• Umwelttechnische Vorgaben:	Die Zuordnungswerte Z 0 des LAGA-Merkblatts dürfen nicht überschritten werden.
• Einbauwassergehalte bzw. Konsistenz:	mindestens steife, maximal halbfeste Konsistenz
• Rohdichteklasse:	3 (mittlere Trockendichte) (Als Anhaltswert entspricht dies einer Trockendichte von 1,45 bis 1,65 g/cm³).
• erforderliche Scherfestigkeit des Materials bzw. in den angrenzenden Schichtfugen beim Einbau in den Böschungsabschnitten[1)]:	cal φE > 25° (bei einer Auflast von 30 kN/m^2)
• nutzbare Feldkapazität:	nFK > 17,5 Vol.-%
• Luftkapazität:	LK > 10 Vol.-% [*2)]
• pH-Wert Bereich	6,0 bis 7,5 (schwach sauer bis sehr schwach alkalisch)

*1) Voraussetzung für die Festlegung dieses erforderlichen Reibungswinkels war die Forderung einer Zunahme der Wasserdurchlässigkeit der Materialien im eingebauten Zustand von oben nach unten. Damit sollte ein Wasseraufstau in der Wasserhaushaltsschicht vermieden werden.

*2) In der Baubesprechung vom 09.07.03 bzw. 23.07.2003 wurde – abweichend vom QSP – zwischen allen Beteiligten einvernehmlich vereinbart, dass unmittelbar nach dem Einbau eine Luftkapazität von 7 bis 8 % – insbesondere im Böschungsbereich, wo der Boden mit leichter Verdichtung eingebaut werden muss – noch tolerabel ist.

5.2.2 Oberboden der Wasserhaushaltsschicht

Der Oberboden besteht aus natürlichem Oberboden aus der Sandgrube „St. Johann“ sowie aus einer Mischung aus Löss und Fertigkompost.

Nachfolgend sind die Anforderungen an den Oberboden gemäß des projektspezifischen Qualitätssicherungsplans (QSP) aufgeführt:

• Bodenart:	Sl4 (stark lehmiger Sand)
• Feinbodenanteil (d < 2 mm):	≥70 Gew.-%
• Zulässige Kornfraktionen des Feinbodens:	Ton 12 bis 17 % Schluff 10 bis 40 % Sand 43 bis 78 %
• Grobbodenanteil (d ≥ 2mm):	< 30 Gew.-%
• Größtkornabmessung:	< 10 cm (Kantenlänge bzw. Durchmesser)
• Humusgehalt:	4 Gew.-% *3) (Die Einarbeitung von Fertigkompost mit RAL-Gütezeichen, Rottegrad IV bis V, Körnung 0/25 mm ist zulässig)
• Boden frei von:	Eisensulfid
• Umwelttechnische Vorgaben:	Die Zuordnungswerte Z 0 des LAGA-Merkblatts dürfen nicht überschritten werden
• Einbauwassergehalte bzw. Konsistenz:	mindestens steife, max. halbfeste Konsistenz
• Rohdichteklasse	3 (mittlere Trockendichte) (Als Anhaltswert entspricht dies einer Trockendichte von 1,45 bis 1,65 g/cm³).
• erforderliche Scherfestigkeit des Materials beim Einbau in den Böschungsabschnitten*1):	cal $\varphi E \geq 25°$ (bei einer Auflast von 10 kN/m^2)
• nutzbare Feldkapazität :	nFK ≥ 21 Vol.-%
• Luftkapazität:	LK ≥ 10 Vol.-% *2)
• pH-Wert Bereich	6,0 bis 7,5 (schwach sauer bis sehr schwach alkalisch)

*1, *2) Hierzu gelten die gleichen Anmerkungen wie beim Unterboden

*3) Empfehlung des LBG: vorzugsweise niedriger als 4 Gew.-%

5.3 Materialgewinnung und Einbau

Da die längerfristige Zwischenlagerung zu Qualitätsverlusten führen kann (DIN 19731), ist aus fachlicher Sicht die Entnahme und der Einbau ohne Zwischenlagerung zu empfehlen.

Für die Wasserhaushaltsschicht des Altabschnittes der KMD Sprendlingen waren ca. 110.000 m³ Unterboden und ca. 38.000 m³ Oberboden erforderlich.

Für den Unterboden der Wasserhaushaltsschicht war Löss aus verschiedenen Bereichen der benachbarten Sandgrube „St. Johann“ eingesetzt worden.

Als Oberboden der Wasserhaushaltsschicht wurde einerseits der über dem Löss anstehende natürliche Oberboden sowie ein off-site hergestelltes Gemisch aus Löss und Fertigkompost nach mehreren vorangegangenen Eignungsuntersuchungen und Probeeinbauversuchen mit verschiedenen Mischtechniken und Mischungsverhältnissen in einem Mischungsverhältnis von 5 : 1 eingebaut.

Auf dem Plateau wurde zuerst der Unterboden und anschließend der Oberboden auf überhöht angelegten Baustraßen abgekippt und mit einem Langarmbagger mit Humuslöffel (glatte Schneide) locker „eingestreut“. Die abschließende Profilierung der jeweiligen Oberflächen erfolgte mit einem Pistenbulli. Die Baustraßen wurden anschließend wieder zurückgebaut.

Aufgrund der positiven Erfahrungen in mehreren Probefeldern wurde der Unterboden im Böschungsbereich mit einer Moorraupe vor Kopf eingeschoben. Das Lössmaterial war sehr trocken und büßte daher bei diesem Einbauverfahren nicht an Qualität ein. Aufgrund der nach unten abnehmenden Dichte und damit der Zunahme der Wasserdurchlässigkeit des Bodens konnte so die Forderung des QS-Plans einer nach unten zunehmenden Wasserdurchlässigkeit zur Vermeidung von Stauhorizonten grundsätzlich erfüllt werden.

Im Nahbereich der Bermenwege wurde der Rekultivierungsboden mit dem Bagger eingestreut.

5.4 Untersuchungsergebnisse

5.4.1 Untersuchungsergebnisse Unterboden

Korngrößenverteilung

An 17 entnommenen Proben wurde die Korngrößenverteilung nach DIN 18123 bestimmt. In Tabelle 3 sind die Ergebnisse als Bandbreite und Mittelwert, getrennt nach den verschiedenen Entnahmestellen, zusammengefasst.

Nach DIN 4022 ist der untersuchte Boden überwiegend als sandiger, schwach toniger Schluff einzustufen. Mit den ermittelten Ton-, Schluff- und Sandanteilen des Feinbodens erfolgt eine Klassifizierung in die Bodenarten Uls (sandig-lehmiger Schluff) bzw. Ut3 (mittel toniger Schluff).

Bei dem im Unterboden eingebauten Löss ist der Schluffanteil deutlich höher und der Sandanteil des untersuchten Bodens deutlich niedriger, als im QSP gefordert. Wie die ermittelten Werte der nutzbaren Feldkapazität zeigen, ist dies für das Bodenwasserrückhaltevermögen jedoch sehr förderlich.

Tabelle 3: Korngrößenverteilung Unterboden

	Anforderung	Löss aus den Flurstücken 73/1, 73/2 und 74	Löss aus den Flurstücken 64 und 65
Größtkorn	dmax ≤100 mm	8 mm	8 mm
Grobbodenanteil (Anteil Kornfraktion Ø > 2 mm)	≤ 30 %	1 bis 3 %, i.M. 2 %	0 bis 2 %, i.M. 1 %
Feinbodenanteil (Anteil Kornfraktion Ø < 2 mm)	≥ 70 %	97 bis 99 %, i.M. 98 %	98 bis 100%, i.M. 99 %
Tonanteil des Feinbodens	12 bis 17 %	13 bis 14 %, i.M.14 %	12 bis 16 %, i.M. 14 %
Schluffanteil des Feinbodens	10 bis 40 %	52 bis 59 %, i.M. 56 %	61 bis 74 %, i.M. 69 %
Sandanteil des Feinbodens	43 bis 78 %	27 bis 35 %, i.M. 30 %	13 bis 23 %, i.M. 17 %
Bodenart nach DIN 4022	-	Vorwiegend U, s, t'	Vorwiegend U, s, t'
Bodenart des Feinbodens	Sl4	Vorwiegend Uls	Vorwiegend Ut3

Bodenwasserrückhaltevermögen und Luftkapazität

An 16 Proben sind die Parameter des Bodenwasserrückhaltevermögens nach DIN ISO 11274 unter Einsatz eines Sandsaugtisches (für pF ≤ 1,8) und einer Druckmembranzelle (für pF > 1,8) ermittelt worden. Dafür wurden im Baufeld ungestört entnommene Einzelproben mit der im Feld unmittelbar nach Einbau des Bodens vorliegenden Lagerungsdichte untersucht.

Die Trockendichten der untersuchten Proben wurden zwischen 1,23 und 1,62 g/cm³ bei einem Mittelwert von 1,45 g/cm³ festgestellt.

Nach den Untersuchungen liegt die nutzbare Feldkapazität mit 24,3 ± 3,5 % deutlich über der gemäß QSP geforderten nutzbaren Feldkapazität von nFK ≥ 17,5 %. Der kleinste, aber noch in der Größenordnung der Anforderungen liegende Wert wurde an der Probe Rku-11 mit einem Einzelwert von 17,3 % bestimmt.

Die zugehörige Luftkapazität der untersuchten Proben wurde mit 11,3 ± 1,8 % ermittelt. Lediglich bei vier Proben (drei davon aus dem Böschungsbereich) wurde die gemäß QSP erforderliche Luftkapazität von ≥ 10 % mit Werten zwischen 8,8 und 9,9 % geringfügig unterschritten. Diese Werte liegen aber noch über der vereinbarten unteren Toleranzgrenze von etwa 7 bis 8 %.

5.4.2 Untersuchungsergebnisse Oberboden

Korngrößenverteilung

An 8 Proben wurde die Korngrößenverteilung nach DIN 18123 bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Mit den ermittelten Ton-, Schluff- und Sandanteilen des Feinbodens erfolgt eine Klassifizierung in die Bodenarten Ut3 (mittel toniger Schluff) für den natürlichen Oberboden bzw. Uls (sandig-lehmiger Schluff) für die Mischung Löss-Kompost. Wie auch beim Unterboden fest-

gestellt, ist im eingebauten Oberboden der Schluffanteil höher und der Sandanteil des untersuchten Bodens niedriger, als im QSP gefordert.

Tabelle 4: Korngrößenverteilung, Oberboden

	Anforderung	Oberboden aus den Flurstücken 64 und 65	Mischung Löss-Kompost im Volumenverhältnis 5:1
Größtkorn	dmax ≤100 mm	8 mm	8 mm
Grobbodenanteil (Anteil Kornfraktion Ø > 2 mm)	≤ 30 %-	0 bis 1 %, i.M. 1 %	2 bis 7 %, i.M. 4 %
Feinbodenanteil (Anteil Kornfraktion Ø < 2 mm)	≥ 70 %	99 bis 100 %, i.M. 99 %	93 bis 98 %, i.M. 96 %
Tonanteil des Feinbodens	12 bis 17 %	14 bis 19 %, i.M.16 %	12 bis 14 %, i.M. 13 %
Schluffanteil des Feinbodens	10 bis 40 %	66 bis 71 %, i.M. 68 %	58 bis 63 %, i.M. 59 %
Sandanteil des Feinbodens	43 bis 78 %	15 bis 18 %, i.M. 17 %	22 bis 27 %, i.M. 24 %
Bodenart nach DIN 4022	-	Vorwiegend U, s, t	Vorwiegend U, s, t'
Bodenart des Feinbodens nach [30]	Sl4	Vorwiegend Ut3	Vorwiegend Uls

Bodenwasserrückhaltevermögen und Luftkapazität

An 16 Proben sind die Parameter des Bodenwasserrückhaltevermögens nach DIN ISO 11274 unter Einsatz eines Sandsaugtisches (für pF ≤ 1,8) und einer Druckmembranzelle (für pF > 1,8) ermittelt worden. Dafür wurden die im Baufeld ungestört entnommenen Einzelproben mit der im Feld unmittelbar nach Einbau des Bodens vorliegenden Lagerungsdichte untersucht.

Nach den Untersuchungen liegt die nutzbare Feldkapazität mit 23,2 ± 3,3 % über der gemäß QSP geforderten nutzbaren Feldkapazität von nFK ≥ 21 %. Die vereinbarte Toleranzgrenze der nutzbaren Feldkapazität von 16 bis 17 Vol.% (unmittelbar nach dem Einbau) wurde mit allen der 16 untersuchten Proben überschritten. Der kleinste Wert wurde an den Proben Rko-11 und Rko-12 mit jeweils 18,5 Vol.% bestimmt.

Die zugehörige Luftkapazität der untersuchten Proben wurde mit 12,2 ± 3,0 % ermittelt. Lediglich bei zwei Proben wurde die gemäß QSP erforderliche Luftkapazität von ≥ 10 % mit Werten von 9,7 und 9,9 % geringfügig unterschritten. Diese Werte liegen aber noch deutlich über der vereinbarten unteren Toleranzgrenze von etwa 7 bis 8 % (unmittelbar nach dem Einbau).

5.5 Empfehlungen

Es hat sich gezeigt, dass

- Planer und Baufirmen vor dem Einbau locker geschütteter Rekultivierungsschichten in Böschungsbereichen zurückschrecken und hierfür keine Gewährleistung übernehmen wollen, solange noch nicht genügend Langzeiterfahrungen vorliegen,
- Deponieprofilierungen und Böschungsneigungen sich am problemlosen Einbau des Oberflächenabdichtungssystems orientieren müssen, da sonst aufwändige Böschungskonstruktionen erforderlich sind,
- bei Einbau von trockenem Rekultivierungsmaterial auch höhere Bodenpressungen als 15 kPa möglich sind, ohne den Boden zu schädigen,
- bei lockerem Einbau von gut geeignetem Rekultivierungsmaterial in niederschlagsarmen Regionen aufwändige Oberflächenwassersammler und Rückhaltebecken überflüssig sind,
- Wasserhaushaltsschichten in niederschlagsarmen Gebieten trotz spärlicher Bepflanzung in den ersten beiden Jahren kaum durchsickert werden, da sie noch nicht wassergesättigt sind,
- die Zielvegetation entgegen der Wünsche der Deponiebetreiber nicht von Anfang an installiert werden kann, sondern im Lauf der Zeit entwickelt werden muss,
- die Sinnhaftigkeit und Effektivität von Pflegearbeiten immer wieder einer Überprüfung bedarf.

5.6 Abschließende Bewertung

Unter Berücksichtigung der fachtechnischen Überwachung vor Ort sowie aller vorliegenden Versuchsergebnisse der baubegleitenden Kontrollprüfungen der Eigenüberwachung und der Fremdüberwachung (unmittelbar nach dem Einbau der verschiedenen Erdbaustoffe) ist zusammenfassend eine den Anforderungen des Qualitätssicherungsplanes bzw. den teilweise im Zuge der Bauausführung getroffenen Anpassungen entsprechende Ausführung der Baumaßnahme festzustellen.

Die von der geotechnischen Fremdüberwachung im Rahmen der Bauausführung anhand von Kontrollprüfungen ermittelten Versuchsergebnisse zeigen unter Berücksichtigung der materialspezifisch bedingten Streuungen eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Eigenüberwachung.

Im Plateaubereich wurde durch den Einsatz von Langarmbaggern, Pistenbulli und Transportfahrzeugen auf Baustraßen, die anschließend zurückgebaut wurden, aus bodenphysikalischer Sicht ein gutes Ergebnis erzielt. Auf Grund des trockenen Einbaumaterials konnte im Böschungsbereich trotz Einsatz von Moorraupen mit zu hoher Bodenpressung (26 kPa anstatt max. 15 kPa) ein tolerierbarer Einbauzustand erreicht werden.

Wie immer bei Baumaßnahmen mit Pioniercharakter lassen sich die Anforderungen nicht von Anfang an genau bis ins Detail festlegen. Die Flexibilität aller Beteiligten ist gefragt, bis realitätsnahe Anforderungen und machbare Lösungen gefunden sind. Abweichungen von den Idealvorstellungen sind dabei nicht immer auszuschließen.

6 Ehemalige Industriemülldeponie Prael, Sprendlingen/Rhh.

6.1 Bemerkungen

Eine optimierte Rekultivierungsschicht ähnlich einer Wasserhaushaltsschicht wurde im Lauf der letzten beiden Jahre auf die Oberfläche der ehemaligen Industriemülldeponie Prael in Sprendlingen/Rhh. aufgebracht. Auch hier wurden Unter- und Oberböden locker eingebaut.

Die Untersuchungen des Fremdüberwachers und der behördlichen Fremdüberwachung (LGB) werden zur Zeit ausgewertet. Erste Ergebnisse können daher nur mündlich vorgetragen werden.

7 Literatur

AG BODEN (1996): Bodenkundliche Kartieranleitung. 4. Aufl., Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohrstoffe & Geologische Landesämter in der Bundesrepublik Deutschland

AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Aufl., Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohrstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen geologischen Diensten der Bundesrepublik Deutschland

FEIN, W. & E. MANZ (2001): Bau einer Wasserhaushaltsschicht – Die Praxis zur Theorie am Beispiel der Deponie Eisenberg (Donnersbergkreis). – In: Maier-Hart, U. (Hrsg.): Oberflächenabdichtung und Rekultivierung von Deponien. – 4. Deponieseminar am 28.3.2001. - Mainz

MAIER-HARTH, U. & BRÄCKELMANN, H. (2005): Die Wasserhaushaltsschicht – Konzept und Durchführung am Beispiel der Hausmülldeponie Sprendlingen, Kreis Mainz-Bingen. – In: Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz und Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (Hrsg.): Sanierung, Oberflächenabdichtung, Rekultivierung und Nachsorge von Deponien. – 5. Deponieseminar am 20.9.2005. – Mainz

MAIER-HARTH, U. & S. SAUER (2005): Mischung unterschiedlicher Böden für die Rekultivierungsschicht am Beispiel der Deponie Meisenheim, Kreis Bad Kreuznach. In: Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz und Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (Hrsg.): Sanierung, Oberflächenabdichtung, Rekultivierung und Nachsorge von Deponien. – 5. Deponieseminar am 20.9.2005. – Mainz.

MELCHIOR, S. (2001b): Innovative Oberflächenabdichtungssysteme und Empfehlungen zum Einbau von Rekultivierungsschichten auf Deponien. - In Maier-Harth, U. (Hrsg.): Oberflächenabdichtung und Rekultivierung von Deponien. – 4. Deponieseminar des Landesamtes für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz am 28.3.2001. – Mainz

MELCHIOR, S. & A. CLAUSSEN (2005): Praxiserfahrungen und Ergebnisse der Qualitätssicherung bei der Rekultivierung von Deponien. – Praxistagung Deponie 2005. – Hannover

MINISTERIUM FÜR UMWELT UND FORSTEN (1998): Wasserwirtschaftlicher Rahmenplan Rheinhessen. - Mainz

PUSCH, H., Y. HAMAD & J. WEIß (2002): Deponie Meisenheim Sanierung des Altmüllkörpers: Probefeldbau für Wasserhaushaltsschicht, Ergebnisse und Vorgaben für die Ausführung, Prüfbericht Nr. 6, erstellt im Auftrag des Abfallwirtschaftbetriebs des Landkreises Bad Kreuznach, 21.05.2002; Bingen

SAUER, S., WOURTSAKIS, A. & U. MAIER-HARTH (2003): Charakterisierung des Einbauzustandes der Rekultivierungsschicht der Deponie Meisenheim. - Unveröffentlichtes Gutachten des LGB Rhld.-Pf.; Mainz

VICK, R. (2001): Konzept zum Anlegen eines Probefeldes auf der Deponie Meisenheim. – Gutachten im Auftrag des Abfallwirtschaftsbetriebes Bad Kreuznach, 17.10.2001; Mörfelden-Walldorf

Wourtsakis, A. & U. Maier-Harth (2001): Charakterisierung des Einbauzustandes der Rekultivierungsschicht der Deponie Eisenberg. - Unveröffentlichtes Gutachten des LGB Rhld.-Pf.; Mainz

www.lgb-rlp.de (2005): Aufbau einer Wasserhaushaltsschicht in niederschlagsarmen Gebieten bis ca. 650 mm/J.; Empfehlungen für die Bepflanzung von Wasserhaushaltsschichten in niederschlagsarmen Gebieten bis ca. 650 mm/J.; Eignungs- und Kontrollprüfungen für Bodenmaterial in Deponie-Rekultivierungsschichten. - Homepage des Landesamtes für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz. – Mainz

Ingenieurbiologische Sicherung von Deponieböschungen in der Praxis am Beispiel der Deponie Blumentobel

Michael Koser, UW Stuttgart

Inhalt

1 Einleitung

Der Abfallwirtschaftsbetrieb des Landkreises Esslingen betreibt auf der Gemarkung Beuren die Deponie Blumentobel mit einer planfestgestellten Gesamtfläche von ca. 24 ha (inkl. Betriebsflächen, Deponierandwegen und Deponieeingangsbereich). Die Deponie ist untergliedert in eine Hausmülldeponie und einen als Erd- und Bauschuttdeponie genutzten Bereich. Der Hausmüllbereich ist bereits seit dem Jahr 2000 verfüllt, während die Erd- und Bauschuttdeponie derzeit noch betrieben wird.

Seit Oktober 2003 erfolgen die Arbeiten zum Aufbringen einer Oberflächenabdichtung im Hausmüllbereich der Deponie mit einer Fläche von 8,7 ha. In der Hauptfläche von ca. 8 ha wird ein Kombinationsabdichtungssystems nach TA Siedlungsabfall (50 cm mineralische Dichtung/Kunststoffdichtungsbahn) aufgebracht.

Im Deponieeingangsbereich besteht ein Steilbereich. Hier wurde die ursprünglich extrem steile Böschung durch den Bau entsprechender Stützkonstruktionen am Böschungsfuß in Verbindung mit einer Profilierung abgeflacht auf eine Böschungsneigung von 1 : 2,5. In diesem Steilbereich mit einer Fläche von 0,7 ha wurde aus Standsicherheitsgründen abweichend von der Hauptfläche ein rein mineralisches Dichtungssystem (ohne Kunststoffdichtungsbahn) ausgeführt.

In der gesamten Fläche wird oberhalb der Dichtschichten eine Rekultivierungsschicht aufgebracht. Die Rekultivierungsschicht des Steilbereiches wurde durch einen ingenieurbiologischen Verbau (sog. Buschlagenverbau) gesichert.

Im Rahmen der Baumaßnahme erfolgt weiterhin eine Teilsanierung der Sickerwasserableitung und ein Ausbau des Entgasungssystems.

2 Kurzdarstellung der durchzuführenden Baumaßnahme und Rahmenbedingungen für den Buschlagenverbau

2.1 Örtliche Situation

Der nachfolgend dargestellte Lageplan zeigt die Situation vor Ort.

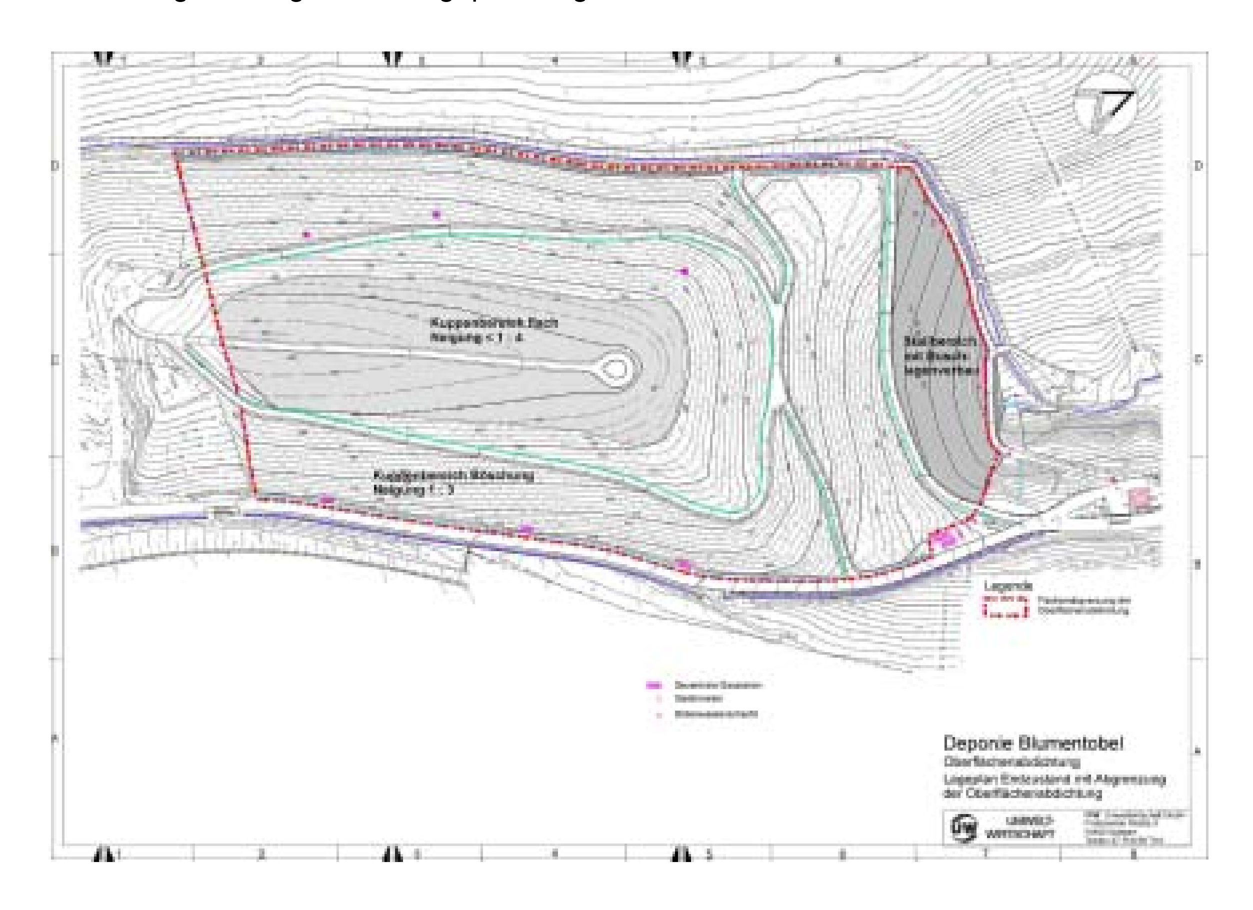


Abbildung 1: Lageplan der Deponie Blumentobel

Eine Besonderheit der Baustelle stellt der im Lageplan grau hinterlegte Steilbereich dar. Hier bestanden vor Beginn der Arbeiten auf einer Fläche von ca. 0,7 ha extrem steile Böschungen mit einer Neigung von stellenweise bis zu 1 : 1,5. In diesem Bereich erfolgte die Böschungssicherung mittels Buschlagenbau.

In der Hauptfläche bestehen Böschungsneigungen von 1 : 3. Ausschließlich eine Fläche von ca. 2,0 ha im Kuppenbereich der Deponie ist flacher geneigt (< 1 : 4).

2.2 Bau einer Polsterwand

Um im Steilbereich ein Dichtungssystem aufbringen zu können, war zwingend eine Abflachung der Böschungen erforderlich. Direkt am Deponiefuß befindliche Schächte erlaubten dabei keine Verlagerung des Böschungsfußes nach außen. Aus diesem Grund erfolgte hier der Bau einer sog. Polsterwand (bewehrte Erde) mit einer maximalen Gesamthöhe von ca. 8 m. Auf Grund der Anordnung der Polsterwand im Taltiefsten konnte so die Böschungsneigung des Steilbereiches mit einer Außenfläche der Polsterwand von nur ca. 250 m² auf 1 : 2,5 reduziert werden. Ein Schnitt durch den betroffenen Bereich mit Polsterwand ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

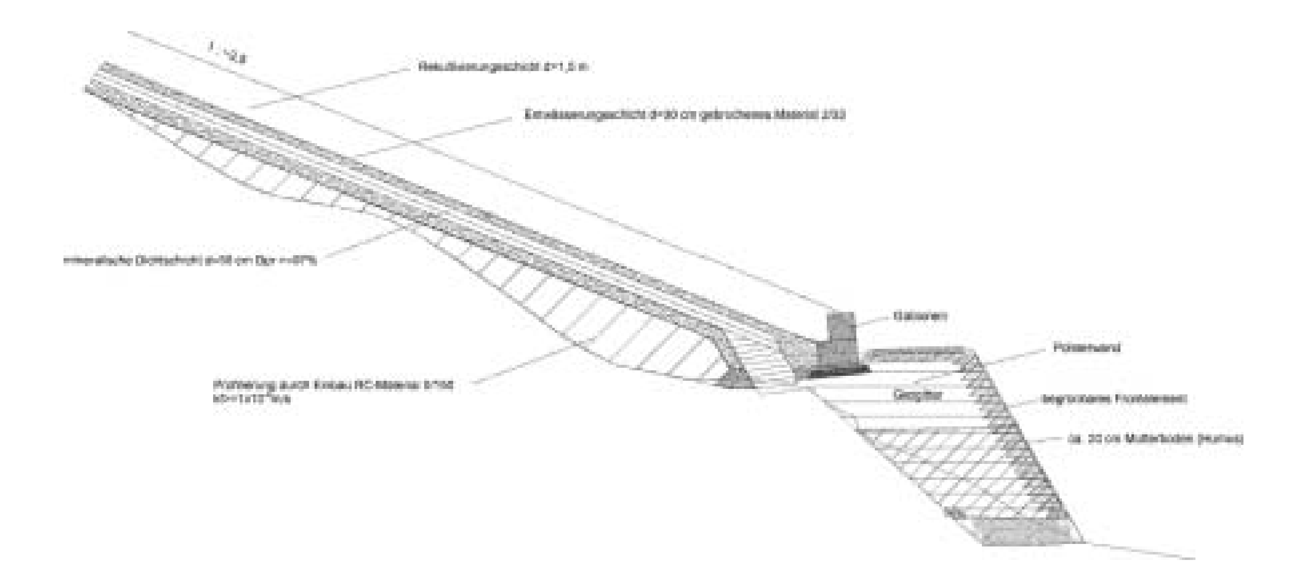


Abbildung 2: Schnitt Steilbereich mit Polsterwand

Der Aufbau der Polsterwand erfolgte durch lagenweisen Einbau von mit Tragschichtbinder verfestigtem Boden, der mit Geogitterlagen bewehrt wurde. Als Geogitter werden aus synthetischen Fasern oder Kunststoffen hergestellte Gitterstrukturen mit unterschiedlichen Knotenverbindungen und Öffnungsweiten bezeichnet. Gemäß Vorgabe der statischen Bemessung wurde ein Geogitter mit einer einaxialen Langzeitzugfestigkeit von 80 KN/m verwendet. Weiterhin waren die erforderlichen Scherparameter des als Verfüllmaterial verwendeten Bodens vorgegeben. Es handelt sich also um ein dem Buschlagenverbau ähnliches Verfahren, wobei für die Bewehrung technische Produkte mit definierter Zugfestigkeit an Stelle lebender Äste verwendet werden. Die Außenhaut der Polsterwand ist mit einer Neigung von 60° mit begrünbaren Stahlgitterfrontelementen als verlorene Hilfsschalung hergestellt. Im Bereich direkt hinter den begrünbaren Stahlgitterfrontelementen wurde lagenweise eine Schicht von ca. 20 cm Mächtigkeit begrünbarer Mutterboden leicht verdichtet eingebaut, um den Bewuchs zu gewährleisten.



Abbildung 3: Einbau der Polsterwand

Weiterhin war im Steilbereich oberhalb der Polsterwand eine Gabionenwand (Drahtkörbe mit Steinfüllung) zur Abstützung der Rekultivierungsschicht zu errichten.

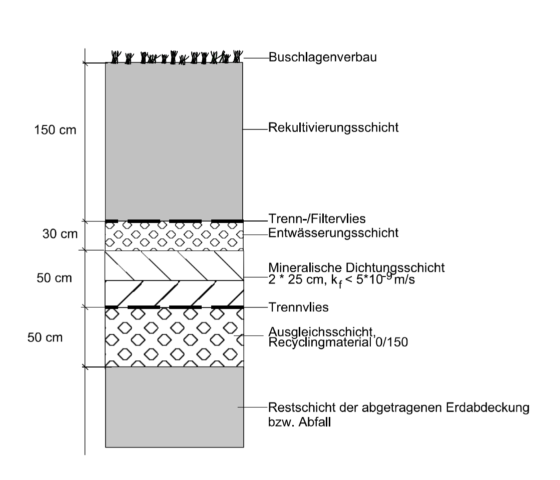


Abbildung 4: Gabionenwand zur Abstützung der Rekultivierungsschicht am Fuß des Steilbereichs

2.3 Dichtungsaufbau

Der im Steilbereich und im Kuppenbereich unterschiedliche Dichtungsaufbau ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

Oberflächenabdichtungssystem Im Steilbereich



Oberflächenabdichtungssystem Im Kuppenbereich

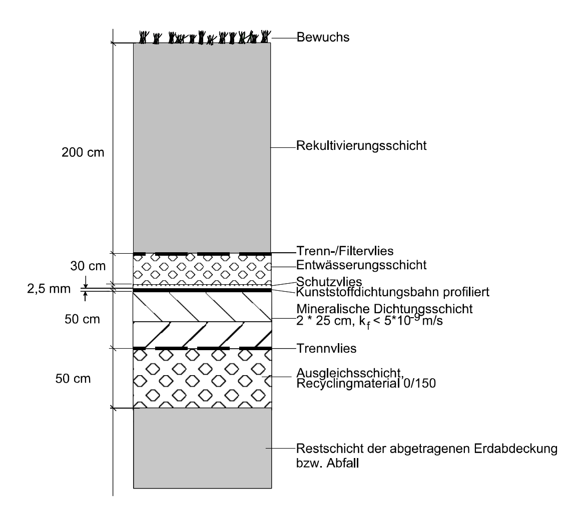


Abbildung 5: Systemskizze Dichtungsaufbau

In der Hauptfläche der Deponie wird auf einer Fläche von ca. 8,0 ha ein Kombinationsabdichtungssystem mit folgendem Aufbau aufgebracht:

- Ausgleichsschicht, Recyclingmaterial 0/150 (50 cm)
- mineralische Dichtung, 2-lagig (2 * 25 cm)
- strukturierte Kunststoffdichtungsbahn, vollflächig verschweißt (2,5 mm) mit geotextiler Schutzlage
- Entwässerungsschicht, Schotter (30 cm)
- Rekultivierungsschicht (2,0 m)

Im Steilbereich mit einer Fläche von 0,7 ha, in dem der Buschlagenverbau installiert wurde, war der Einbau einer Kunststoffdichtungsbahn nicht möglich, da eine von einem geotechnischen Gutachter durchgeführte Standsicherheitsberechnung bei den gegebenen Neigungen eine nicht ausreichende Sicherheit ergab. Daher wurde hier eine rein mineralische Dichtung geplant und auch von den Behörden genehmigt. Abweichend von der Hauptfläche, in der die Rekultivierungsschicht mit einer Mächtigkeit von 2,0 m ausgeführt wird, wurde die Mächtigkeit im Steilbereich auf Grund der schwierigen Böschungsgeometrie auf 1,5 m reduziert.

2.4 Rekultivierungsschicht

Gemäß den bestehenden Genehmigungen bleibt die Deponiefläche Wald im Sinne von § 2.2 Landeswaldgesetz. Das bedeutet, dass die Fläche zwar während der Verfüllung der Deponie zeitweise einer anderen Nutzungsart dient, nach Deponieabschluss jedoch wieder mit Wald zu bepflanzen ist. Nach heutigem Kenntnisstand reicht eine Erdschicht mit der gemäß TA Siedlungsabfall geforderten Mindestmächtigkeit von 1,0 m nicht für eine gezielte Waldanpflanzung aus. Daher beinhaltet die Planung die Ausführung der Rekultivierungsschicht in der Hauptfläche mit einer Mächtigkeit von 2,0 m. Im Steilbereich mit einer Fläche von 0,7 ha ergab sich auf Grund schwieriger geometrischer Verhältnisse das Erfordernis, die Rekultivierungsschicht mit einer Mächtigkeit von 1,5 m einzubauen.

Gemäß den Anforderungen der Genehmigung wurde im Leistungsverzeichnis für den Rekultivierungsboden die Verwendung von Material der Eignungsgruppen A und B gemäß Tabelle 2 der DIN 19731 vorgegeben. Dies bedeutet Böden mit den Bodenartenhauptgruppen des Feinbodens: Schluffe, Lehme, Sande. Böden der Eignungsgruppe C (Tone) sind nicht zugelassen. Bezüglich des Grobbodenanteils ist grundsätzlich Material der Eignungsgruppen a und b der Tabelle 2 der DIN 19731 (Volumenanteil des Grobbodens bis 10 %) zu verwenden. Es ist ein Größtkorn von maximal 100 mm zulässig. Als oberste Schicht von 20 cm Mächtigkeit ist Material aus Oberböden nach der Nr. 3.2 der DIN 19731 zu verwenden. Weiterhin ist die Verwendung von Bodenaushub aus regional anstehenden Vorkommen anzustreben. Die bisher verwendeten Böden mit den überwiegend vorkommenden Bodenartenhauptgruppen Schluff und Lehm sind in die Eignungsgruppe A einzustufen und entsprechen damit den gestellten Anforderungen. Sande der Eignungsgruppe B treten standorttypisch nicht auf. In der Praxis führt die (auch aus wirtschaftlicher Sicht sinnvolle) Vorgabe der Verwendung regional anstehender Böden, die in der Umgebung der Deponie häufig hohe Tonanteile besitzen, zu gewissen Widersprüchen zu den zugelassenen Bodenarten. So dürfte der Tonanteil einzelner Chargen „grenzwertig“ sein.

Aus vegetationskundlicher Sicht war ein Einbau der Böden mit möglichst geringer Verdichtung gefordert. Dieser unverdichtete Einbau wurde auch von den Genehmigungsbehörden im Rahmen der abfallrechtlichen Genehmigung gefordert. Diese Forderung war allerdings mit der Einschränkung versehen, dass davon abgewichen werden kann, sofern dies „aus Standsicherheitsgründen notwendig“ ist. Gemäß den Vorgaben des Standsicherheitsgutachters kann der unverdichtete Einbau jedoch ausschließlich in den flacheren Kuppenbereichen mit Neigungen < 1:4 (ca. 2 ha) durchgeführt werden. Hier ist ein Einbringen der Rekultivierungsschicht durch Gerät mit niedriger Flächenpressung (Moorausstattung) ohne Befahren mit Radfahrzeugen vorgegeben. Aufgrund der zu erwartenden späteren Setzungen des unverdichtet eingebauten Materials erfolgt ein überhöhter Einbau mit einer Anfangsschichtstärke von 2,3 m. Weiterhin soll das Bodenmaterial in einem Arbeitsgang ohne Zwischenbefahrung aufgetragen werden.

In den Böschungsbereichen mit Neigungen zwischen 1:3 und 1:4 (ca. 6 ha) muss die Rekultivierungsschicht dagegen gemäß den Vorgaben des Standsicherheitsgutachters verdichtet eingebracht werden. Dabei ist eine geringere Verdichtung der oberen Lage vorgegeben. Die untere Lage mit einer Mächtigkeit von 1,0 m soll mit einer Proctordichte ≥ 97 % eingebaut werden, die obere Lage mit einer Mächtigkeit von 1,0 m mit einer Proctordichte ≥ 95 %.

Im Steilbereich mit Neigungen größer 1 : 3 (ca. 0,7 ha), in dem die Buschlagen eingebaut wurden, war sogar eine Proctordichte ≥ 97 % über die gesamte Mächtigkeit von 1,5 m gefordert.

Das Ziel eines möglichst unverdichteten Einbaus kann somit wegen der zu gewährleistenden Standsicherheit nur auf einer Fläche von ca. 2 ha erreicht werden. In den steiler geneigten Böschungsbereichen mit einer Gesamtfläche von 6,7 ha wird dagegen aus Standsicherheitsgründen ein verdichteter Einbau erforderlich. In der Praxis führt die Vorgabe einer Mindestverdichtung häufig zu weit höheren Verdichtungen. Hier ist eine Sensibilisierung der ausführenden Firma auf eine Verdichtung möglichst nah an den geforderten Werten von großer Bedeutung.

3 Ingenieurbiologischer Verbau (Buschlagenbau)

3.1 Theoretische Grundlagen

Buschlagen dienen der Befestigung steiler Böschungen. Buschlagen bestehen aus bewurzelungsfähigen Pflanzenteilen und/oder bewurzelten, aus dem Spross ausschlagenden Gehölzen, die auf nach innen geneigten Stufen (ca. 10°) ausgelegt werden. Diese Zweiglagen werden anschließend mit Boden böschungsgleich abgedeckt (siehe auch nachfolgende Prinzipskizze). Möglich ist sowohl ein Einbau der Buschlagen gleichzeitig mit der Schüttung der Böschung, als auch ein späteres Einschneiden der erforderlichen Stufen nach Herstellung der Rekultivierungsschicht. Dabei ist der Einbau der Buschlagen während der Schüttung des Bodenmaterials aus Standsicherheitsgründen vorzuziehen.

Zwischen Boden und Buschlagen kommt es unmittelbar nach Fertigstellung zu einer Verbundwirkung (Armierung). Durch die zunehmende Durchwurzelung des Bodens wird die Standsicherheit des Erdkörpers später weiter erhöht.

Nach Erfahrungen der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA) (BÖNECKE 2003) ist es durch den Einbau von Buschlagen „auch bei steileren Böschungen (<1:3) möglich, Rekultivierungsschichten locker zu schütten“.

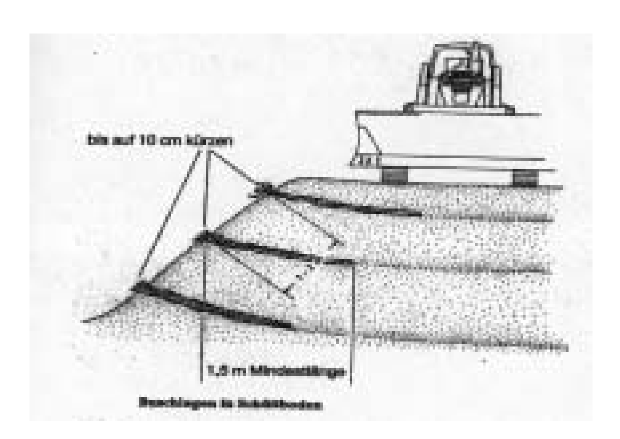


Abbildung 6: Prinzipskizze Buschlagenbau

3.2 Einbau von Buschlagen im Steilbereich

Als Auflage in der abfallrechtlichen Genehmigung für die Oberflächenabdichtung der Deponie Blumentobel aus dem Jahr 2002 ergab sich die nachfolgende Forderung: „Die Anforderungen an die Rekultivierungsschicht im Steilbereich sind zur Klärung der sich zum Teil widersprechenden Belange aus den Standsicherheitsanforderungen sowie den Forderungen an einen für Baumbewuchs geeigneten Standort mit den zuständigen Forstbehörden unter Beteiligung der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA) abzustimmen.

Im Zug dieser Abstimmungen mit den lokalen Forstämtern und der FVA wurde der Vorschlag der FVA zur Sicherung des Steilbereiches durch den Einbau eines Buschlagenverbaus vom Auftraggeber aufgegriffen und in der Ausschreibung der Baumaßnahme mit aufgenommen. Trotz Ausführung des Buschlagenverbaus wurde vom Standsicherheitsgutachter jedoch ein verdichteter Einbau der Rekultivierungsschicht gefordert.

Die Böschungsneigung im betroffenen Bereich beträgt 1:2,5 bei einer maximalen Böschungslänge von 50 m.

Die Ausschreibung der Maßnahme erfolgte in enger Abstimmung mit der FVA Freiburg. Weiterhin erfolgte die Abstimmung der Gewinnung der Äste, der Lagerung und des Zeitpunkts des Einbaus vor Ausführung zwischen Baufirma und FVA.

Gemäß Ausschreibung sollte der Einbau der Buschlagen gleichzeitig mit dem Einbau des Rekultivierungsbodens erfolgen. Vorgabe war ein Einbau der Rekultivierungsschicht abschnittsweise von unten nach oben, so dass jeweils Stufen entstehen, die über die gesamte Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht angelegt sind. Dabei sollte die Zulieferung des Bodenmaterials über die Oberkante der jeweils zuletzt hergestellten Stufe im Vor-Kopf-Einbau erfolgen.

Abweichend davon erfolgte der Einbau auf Wunsch der ausführenden Baufirma nach Abstimmung mit der FVA in der kompletten Lagenstärke auf der Gesamtfläche des Steilbe-

reiches. Dabei wurde festgehalten, dass das Risiko evtl. Rutschungen in der Zeit zwischen Einbau der Rekultivierungsschicht und dem nachfolgenden Einbau der Buschlagen bei der ausführenden Firma liegt. Der Einbau der Buschlagen erfolgte direkt nach Einbau durch Einschneiden der erforderlichen Stufen mit direkter Belegung mit den Ästen. Dabei wurde der Aushub der oberen Stufe jeweils zur Verfüllung der bereits mit lebenden Ästen belegten, unteren Stufe verwendet.



Abbildung 7: Einbau der Buschlagen 4. bis 7. April 2005

Die Stufen wurden in einem vertikalen Abstand von ca. 2,0 m mit einer um ca. 10 Grad nach innen geneigten Oberfläche angelegt. Der Aushub der Stufen und die Wiederverfüllung nach Einbau der Buschlagen erfolgte dabei durch die Baufirma mittels Kettenbagger, die Belegung der Stufen dicht an dicht mit lebenden Ästen (Weide) wurde durch einen Subunternehmer durchgeführt. Die Stufen wurden mit triebfähigen Weidenästen (4-jährige Salix purpurea) mit einer Länge von ca. 1,5 m in einer Anzahl von 10 bis 12 Stück pro Laufmeter belegt. Dabei erfolgte die Anlieferung in Bunden zu je 20 Stück mit einer Länge von 3 m. Die verwendeten Weidenäste wurden dabei vom Subunternehmer geliefert und stammten aus eigenen Plantagen. Die 3 m-Äste wurden dann vor Ort halbiert und so auf die vorgesehene Länge von 1,5 m gebracht. Nach der bauseits erfolgten Verfüllung der Stufe ergab sich ein Überstand der Zweigspitzen von ca. 10 bis 20 cm Länge.

Bei einer Länge der Arbeitsbermen von insgesamt 1.100 m war eine Bauzeit von 4 Tagen für das Einbringen der Buschlagen erforderlich.

Gute Anwuchserfolge bei lebenden Ästen hängen stark vom Schnittdatum und nicht vom Zeitpunkt der Einpflanzung ab. Die beste Zeit ist die Vegetationsruhezeit, von der abgeschlossenen Laubverfärbung bis zur beginnenden Kätzchenblüte. Werden Äste dennoch im Laub geschnitten, ist das Material sofort zu verbauen. Die Ausführung erfolgte Anfang April 2005. Damit konnte der vorgenannten Forderung noch entsprochen werden.

Bereits nach einer Zeit von etwa 2 Wochen konnte ein deutliches Austreiben der Buschlagen beobachtet werden (Abbildung 9).



Abbildung 8: Ansicht Steilbereich mit Buschlagen direkt nach Einbau



Abbildung 9: Austreibende Buschlagen ca. 2 Wochen nach Einbau (21.04.2005)

Nach einem Zeitraum von etwa einem halben Jahr (28.10.2005) sind die Triebe der Buschlagen etwa 1,8 m hoch und stark begrünt.




Abbildung 10: Steilbereich mit Buschlagen ca. 6 Monate nach Einbau (Oktober 2005)

3.3 Fazit Buschlagenbau

Im vorliegenden Fall wurde die Rekultivierungsschicht auf der kompletten Mächtigkeit verdichtet eingebaut, bevor der Buschlagenverbau durch nachträgliches Einschneiden der entsprechenden Arbeitsbermen hergestellt wurden. Somit wurde die Standsicherheit der Rekultivierungsschicht prinzipiell auch ohne Bewehrung durch Buschlagen nachgewiesen. Auf Grund der Bewehrungswirkung durch die Buschlagen wird sich eine zusätzliche Verbesserung der Standsicherheit im Steilbereich ergeben.

Durch das hervorragende Anwuchsverhalten der Buschlagen wird sich die bereits direkt nach Einbau der Buschlagen vorhandene Verbundwirkung in Folge des Wurzelwachstums innerhalb kurzer Zeit weiter verbessert haben. Weiterhin ergibt sich auf Grund des schnellen Austreibens der Weidenäste eine optisch ansprechende Wirkung.

Neben der Bewehrungswirkung innerhalb der Rekultivierungsschicht werden durch den Buschlagenbau Erosionen an der Oberfläche der Rekultivierungsschicht vermindert, indem die Abflussgeschwindigkeit von Oberflächenabflüssen bei Starkregen stark abgebremst wird. Dieser Effekt war im vorliegenden Fall nicht zu vernachlässigen, da wegen der muldenförmigen Böschungsstruktur im Steilbereich bei sommerlichen Starkregen eine starke Erosionsgefährdung bestand, solange die als Erosionsschutz aufgebrachte Rasenansaat noch nicht flächig angewachsen war. Durch den Buschlagenverbau konnte die Bildung von Erosionsrinnen auf ein vernachlässigbares Maß reduziert werden.

4 Literatur

BÖNECKE, G. (2003): Ingenieurbiologischer Verbau, in: WATTENDORF, P., W. KONOLD & O. EHRMANN [Hrsg.] (2003): Gestaltung von Rekultivierungsschichten und Wurzelsperren, Culterra Band 32: 129 - 141, Freiburg

Grundlagen des Genehmigungsverfahrens zur Rekultivierung der Deponie Neuenburg (BA I)

AR Wolfgang Burger, Regierungspräsidium Freiburg

Inhalt

1 Allgemeines

Die Frage der Ausbildung und Gestaltung von Oberflächenabdichtungssystemen spielt seit Inkrafttreten der TASi eine relativ große Rolle in der deponiespezifischen Fachdiskussion. Die teilweise sehr kontrovers geführte Diskussion hat in der Vergangenheit häufig dazu geführt, dass bei der Stilllegung von Deponien die notwendigen Entscheidungen über die Art des Oberflächenabschlusses und den Zeitpunkt seiner Realisierung von den Entscheidungsträgern auf allen Ebenen oftmals nicht getroffen wurden. Der dadurch eingetretene unbefriedigende Zustand hat zur Folge, dass Deponien bzw. Deponieabschnitte, die schon seit langem, teilweise schon vor Inkrafttreten der TASI, stillgelegt worden sind, inzwischen einen dichte Pflanzenbewuchs aufweisen. Die Entscheidung, ob die bestehenden Verhältnisse so belassen werden können oder ob die komplette Pflanzendecke wieder entfernt werden muss um eine neue technische Oberflächenabdichtung aufzubringen, muss nun auf der Basis des geltenden Rechts gefällt werden.

Diese Frage galt es auch für den in der Folge behandelten Fall des Altteils der Deponie Neuenburg zu beantworten.

2 Ausgangssituation

Die Deponie Neuenburg liegt zwischen Freiburg und Basel (CH) in einem schmalen Geländestreifen zwischen der A 5 und dem Altrhein. Das Markgräflerland zeichnet sich in diesem Bereich durch geringe Jahresniederschläge aus.

Die Deponie ist räumlich in zwei Bereiche unterteilt. Der nördliche Altteil ist als separate Halde gestaltet und von den übrigen Deponieabschnitten durch einen Hohlweg getrennt. Sie wurde bis 1984 zunächst von der Stadt Neuenburg als Stadtdeponie und anschließend vom Landkreis Breisgau-Hochschwarzwald als Kreismülldeponie betrieben. Die Böschungsneigungen sind mit 1:1.75 bis 1: 2 relativ steil. Auf dem nördlichen Teil des Deponieab-

schnittes hat sich ein teilweise dichter, gut abgestufter Wald entwickelt. Die restlichen Böschungsflächen sind mit Büschen und vereinzelten Baumgruppen ebenfalls überwiegend dicht bewachsen. Alleinig auf dem Plateau überwiegt der Grasbewuchs, hier stehen einzelne Büsche.

3 Bewertung der Ist-Situation

In der TASi wird unter Nummer 11.2.1 für Altanlagen im Sinne der TASi Folgendes geregelt:

> *„Nach Verfüllung eines Deponieabschnittes ist ein* ***Oberflächenabdichtungssystem*** *aufzubringen. Deponieoberflächenabdichtungssysteme haben den Anforderungen für Deponien der Klasse II nach den Nummern 10.4.1.1 Abs. 2 ff, 10.4.1.2 und 10.4.1.4 zu entsprechen. Wenn große Setzungen erwartet werden, kann bis zum Abklingen der Hauptsetzungen eine Abdeckung vorgenommen werden. Die Abdeckung soll Sickerwasserbildung minimieren und Deponiegasmigration verhindern.*
>
> ***Für Deponieabschnitte, die zum Zeitpunkt des Inkrafttretens dieser technischen Anleitung bereits rekultiviert sind, sind Ausnahmen zulässig, wenn nachgewiesen wird, dass das anfallende Sickerwasser hinsichtlich Menge und Qualität zu keiner Gewässerbeeinträchtigung führt.***
>
> *Bei Altanlagen (Deponien oder Deponieabschnitten), die nach Inkrafttreten dieser technischen Anleitung stillgelegt werden, hat die zuständige Behörde eine Schlussabnahme nach Nummer 10.7.1 durchzuführen."*

Da der Altteil der Deponie Neuenburg zum Zeitpunkt des Inkrafttretens der TASi bereits rekultiviert war, bat der Landkreis zu prüfen, inwieweit Ausnahmen von der generellen Forderung nach einer Oberflächenabdichtung zugelassen werden können.

Bei der Prüfung, ob in konkreten Fall hinsichtlich Menge und Qualität eine Gewässerbeeinträchtigung vorliegt, wurden die Ergebnisse der im Rahmen des Deponiemonitorings durchgeführten regelmäßigen Grundwasserüberwachung sowie die hydrogeologische Gesamtsituation bewertet.

Schlussendlich kam man zum Ergebnis, dass die Qualität des Grundwassers in den maßgebenden Abstrompegeln keine wesentliche Beeinträchtigung aufweist. Die Belastung des Grundwassers in den Abstrompegeln ist in der Vergangenheit stark zurückgegangen und liegt nun wieder in ähnlicher Größenordnung liegt wie in den maßgebenden Zustrompegeln.

Bezüglich der ins Grundwasser emitierenden Sickerwassermenge, ist bei nicht basisabgedichteten Deponien nur schwer eine Aussage möglich. Der Nachweis, dass die Einsickerungsrate von Niederschlagswasser und damit der Sickerwasserbildungsrate in einer Größenordnung liegt, die bei der gegebenen hydrogeologischen Situation zu keiner Gewässerbeeinträchtigung führt, muss daher auf eine andere Art und Weise erbracht werden.

Als Maßstab hierfür wurde die Einsickerungsrate von Niederschlägen herangezogen, die bei der Realisierung einer TASi-konformen Oberflächenabdichtung für eine Deponie der Klasse I nach TASi auftreten würde. Der Nachweis hierüber sollte mittels einer HELP-Modellierung erbracht werden.

4 HELP-Modellierung

Die HELP-Modellierung sollte von einem auf diesem Gebiet ausgewiesenen Fachmann durchgeführt werden. Der Landkreis Breisgau-Hochschwarzwald erteilte für die Gesamtmaßnahme der Universität Freiburg, Institut für Landespflege, den Auftrag. Das Institut zog für die HELP-Modellierung Herrn Dr. Berger von der Universität Hamburg, Institut für Bodenkunde, hinzu, der im Auftrag des Umweltbundesamtes die Validierung und Anpassung des Simulationsmodells HELP an deutsche Verhältnisse vorgenommen hat und somit als ausgewiesener Fachmann auf diesem Gebiet gilt.

Um die Modellierung mit einem hohen Detaillierungsgrad durchführen zu können, wurden die Bodenparameter der bestehenden Rekultivierungsschicht vom Institut für Landespflege der Uni Freiburg in einem 20-Meter-Raster mittels Bohrstock entnommen und im Labor untersucht. Mit diesen Daten wurde danach über zwei Leitprofile die HELP-Modellierung durchgeführt.

5 Ergebnis und Konsequenz für die Ertüchtigung der Rekultivierungsschicht

Das Ergebnis war, dass die bestehende Rekultivierungsschicht nicht flächendeckend die erforderliche Wirkung aufwies, so dass sie in Teilbereichen definiert nachgebessert werden muss. Das Plateau, welches nur einen geringen Bewuchs aufweist, wird zunächst durch Auftrag von Erdaushub profiliert und mit einer verschweißten PEHD-Folie bzw. Dichtungsbahn abgedichtet. Auf dieser Folie wird eine 20 cm starke Entwässerungsschicht und darüber eine den Vorgaben der Modellierung entsprechende Rekultivierungsschicht aufgebracht. Das auf der Folie ankommende, eingesickerte Niederschlagswasser wird gefasst und zwei Messschächten zugeführt, in welchen die Wassermengen erfasst und in Datenlogger gespeichert werden. Auf diese Art und Weise kann die Folienabdichtung als Großlysimeter verwendet werden, so dass hier in Verbindung mit den Wetterdaten eine Wasserbilanzierung vorgenommen werden kann.

Neben dem Anforderungsprofil an die Rekultivierungsschicht spielt aber auch der abgestufte Pflanzenbewuchs in diesem Gesamtsystem eine wichtige Rolle. Hier konnte die Universität Freiburg ihre Erkenntnisse im Zusammenhang mit der Untersuchung der Grundwasserneubildungsraten unter Wäldern einbringen. Demnach besitzt der großteils heute schon bestehende Wald eine fast optimale Funktion als Wasserhaushaltswald. Auf dem Plateau wird nach Aufbringung der Rekultivierungsschicht ein ähnlich strukturierter Wald gezielt entwickelt. Um die Wirkung des Waldes auch langfristig sicherzustellen, wird der Wasserhaushaltswald zukünftig nach einem entsprechend entwickelten Waldpflegeplan gepflegt.

6 Können auch die Anforderungen der AbfAblV und der DepV eingehalten werden?

Nach Inkrafttreten der AbfAblV und der DepV war weiter zu prüfen, ob neben den Regelungen der TASi noch weitere Regelungen dieser Verordnungen Anwendung finden.

Die AbfAblV ist in konkreten Fall nicht einschlägig, da sie im Hinblick auf den Oberflächenabschluss einer Deponie keine über die Vorgaben der TASi hinausgehende maßgebende Regelungen beinhaltet.

Auch die Deponieverordnung (DepV) findet im Falle des Altteils der Deponie Neuenburg nach § 1 Abs. 3 die DepV keine Anwendung.

7 Fazit

Am Beispiel des Altteils der Deponie Neuenburg konnte gezeigt werden, dass in einer niederschlagsarmen Region durch eine Optimierung der Rekultivierungsschicht und durch eine gezielte Entwicklung eines Wasserhaushaltswaldes die Einsickerung von Niederschlagswasser erheblich reduziert werden kann. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen im Falle der Deponie Neuenburg auch als Basis für die Planung des Oberflächenabdichtungssystems der restlichen Deponieabschnitte. **Denn auch bei einer hierfür angedachten regelkonformen bzw. gleichwertigen technischen Oberflächenabdichtung sollte die Langzeitkomponente „Rekultivierungsschicht“ in Verbindung mit einem Wasserhaushaltswald nicht vernachlässigt und ihre langfristige und nachhaltige Wirkung als Beitrag zur Generationengerechtigkeit gezielt genutzt werden.**

8 Literatur

TA-Siedlungsabfall (TASi) vom 14. Mai 1993

Deponieverordnung (DepV) vom 24. Juli 2002

Ablagerungsverordnung (AbfAblV) vom 20. Februar 2001

Antragsunterlager des Landkreises Breisgau-Hochschwarzwald

"Rekultivierung des Altteils der Deponie Neuenburg vom 20. Februar 2001" (erstellt vom Institut für Landespflege der UNI Freiburg)

Konzeption einer Wasserhaushaltsschicht für die Deponie Neuenburg (BA I)

Peter Wattendorf, Institut für Landespflege, Universität Freiburg

Inhalt

1 Ausgangslage

1.1 Deponie Neuenburg

Die Deponie Neuenburg liegt auf der Gemarkung der Stadt Neuenburg zwischen Rhein und Autobahn A 5. Die Entfernung zum Rhein beträgt etwa 100 m, die Autobahntrasse schließt sich im Osten direkt an das Betriebsgelände an. Die Deponie wurde von der Stadt Neuenburg als Haldendeponie in einer ehemaligen Kiesgrube angelegt und im Jahr 1974 vom Abfallwirtschaftsbetrieb des Landkreises Breisgau-Hochschwarzwald (ALB) übernommen. Sie ist in vier Betriebsabschnitte gegliedert, die insgesamt eine Fläche von 12 ha einnehmen. Die Deponie wurde zum 31.12.1996 für die Abfallanlieferung geschlossen und die Betriebsabschnitte II bis IV für die Nachsorgephase mit einer temporären Abdeckung versehen.

Die hier vorgestellte Rekultivierungsplanung betrifft ausschließlich Betriebsabschnitt I (BA I). Er ist der älteste Deponieteil, als separate Halde gestaltet und von den übrigen Abschnitten durch einen auf Geländeniveau verlaufenden Weg getrennt. BA I wurde von der Stadt Neuenburg und der ALB bis zum Jahr 1984 betrieben. In ihm wurden ca. 0,54 Millionen m³

Hausmüll, hausmüllähnlicher Gewerbemüll sowie Bauschutt abgelagert und sukzessive mit Bodenmaterial und erdreichem Bauschutt überdeckt. BA I besitzt keine Basis- und Oberflächenabdichtung. Der sandig-kiesige Untergrund ist gut wasserdurchlässig.

Betriebsabschnitt I umfasst eine Gesamtfläche von ca. 6 ha. Mit einer Höhe von max. 241 m ü NN überragt er sowohl die umgebenden Waldflächen um über 25 m als auch die in geringer Entfernung auf einem Damm verlaufende Autobahn. Die Böschungen sind mit Neigungen zwischen 1:1,75 und 1:2 steil. Im Vergleich zu den später angelegten Betriebsabschnitten II bis IV weist der BA I ein abwechslungsreiches Relief mit unterschiedlichen Böschungsneigungen und –längen, kleineren Verebnungen und einer unregelmäßig gestalteten Deponiekuppe auf.

Zu Beginn der Rekultivierungsplanung war ungefähr die Hälfte der Fläche des BA I (3,2 ha) mehr oder weniger dicht bewaldet, auf 1,7 ha hatten sich über Sukzession Grasbestände und Staudenfluren unterschiedlicher Ausprägung angesiedelt.

1.2 Klima in Neuenburg

Das Gebiet der Stadt Neuenburg ist der naturräumlichen (Unter-)Einheit Markgräfler Rheinebene zuzuordnen. Insgesamt gesehen gehört die südbadische Rheinaue zu den wärmsten und trockensten Gebieten Deutschlands. Der Windschatten der Vogesen reduziert die Niederschläge vor allem in der westlichen Oberrheinebene und begünstigt durch die niedrige Lage herrschen sonnenreiche, warm-kontinentale Bedingungen mit langer Vegetationsperiode.

Die langjährige Niederschlagsverteilung zeigt ein schwach ausgeprägtes Sommermaximum, trotzdem treten Trocken- bzw. Dürrejahre für die Vegetation regelmäßig auf (REIF 1996). Die meisten Niederschläge werden von Südwest- und Nordwinden herangebracht. Langjährige, d.h. mindestens 30-jährige Messreihen sind für Neuenburg nicht verfügbar, bei der ca. 12 km nördlich gelegene Station Hartheim-Bremgarten (ca. 200 m ü. NN) fallen im langjährigen Mittel 667 mm Niederschlag im Jahr, die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt 10,0 °C[6].

Zur Beurteilung der Funktion der Abdeckschicht im Hinblick auf die Minimierung von Sickerwassereinträgen in den Deponiekörper sind vor allem die **Niederschläge** und ihre Verteilung von Bedeutung. In Neuenburg liegen aus mehreren Gründen günstige Bedingungen vor:

1. Die Jahresniederschläge sind relativ niedrig, gleichzeitig ist die Jahresdurchschnittstemperatur für mitteleuropäische Verhältnisse recht hoch.
2. Auch die Verteilung der Niederschläge ist günstig, denn der größte Teil fällt während der Vegetationsperiode, wenn auch die Evapotranspiration Höchstwerte erreicht.

Witterung in den Jahren 1995, 1997 und 1998

Für die Modellierung des Wasserhaushalts (siehe 2.4) wurden gezielt Jahre mit unterschiedlicher Niederschlagsmenge herangezogen. Da erst seit wenigen Jahren in Neuenburg Klimadaten aufgezeichnet werden, wurden die Jahre 1995 (805,2 mm Niederschlag = „nass“), 1997 (677,6 mm = „trocken“) und 1998 (733,5 mm = „durchschnittlich“) ausgewählt. Auch

[6] Daten des Instituts für Meteorologie der Universität Freiburg

hinsichtlich der Niederschlagsverteilung bestehen Unterschiede: Während 1995 und 1998 jeweils ca. 55 % des Regens in der Vegetationszeit (Mai bis Oktober) fällt, sind es 1997 sogar 62 % bzw. 421 mm. Das Jahr 1997 ist vor allem aufgrund geringerer Niederschläge außerhalb der Vegetationszeit trockener.

Im Vergleich mit den langjährigen Mittelwerten kann davon ausgegangen werden, dass für die drei betrachteten Jahre insgesamt relativ hohe Niederschläge kennzeichnend waren. Das „Trockenjahr“ 1997 ist somit eher 677 mm als durchschnittlich einzuschätzen.

Die **Jahresdurchschnittstemperaturen** der drei betrachteten Jahre unterscheiden sich nur unwesentlich. Sie betragen für 1995 und 1998 jeweils 11,0 °C und für das Jahr 1997 10,9°C.

1.3 Kenntnisstand und rechtliche Situation[7]

Betriebsabschnitt I ist nach TA SIEDLUNGSABFALL (1993) als Altdeponie anzusehen. Unter Altdeponien werden auch bereits rekultivierte Abschnitte von Deponien verstanden, die zum Zeitpunkt des Inkrafttretens der TASi noch in Betrieb waren. Bei ihnen kann vom Regel-Oberflächenabdichtungssystem abgewichen werden, wenn das anfallende Sickerwasser hinsichtlich Menge und Qualität nachweisbar keine Gewässerverunreinigung verursacht.

Aufgrund der fehlenden Basisabdichtung herrscht im BA I insofern eine besondere Situation, als ein Wasserzutritt in den Deponiekörper nicht nur über Niederschläge, sondern bei hohem Rheinwasserstand auch durch Grundwasserzustrom erfolgen kann.

Die Deponie Neuenburg liegt im Waldverband. Für die Anlage der Deponie liegt eine befristete Umwandlungsgenehmigung nach Landeswaldgesetz vor, die nach Abschluss des Deponiebetriebes wieder einen „Wald gleicher Art und Güte“ vorsieht.

Die Rekultivierungsmaßnahmen auf BA I wurden in der Vergangenheit nicht dokumentiert, insbesondere fehlten zu Beginn des Planungsprozesses jegliche Angaben zum Aufbau und zu den Eigenschaften der Abdeckung. Deshalb beauftragte die ALB das Institut für Landespflege im Jahr 1998 mit einer Bestandsaufnahme und Bewertung der Abdeckung und ihrer Vegetation (Standortsgutachten) inclusive Wasserhaushaltsmodellierung mit dem Programm HELP. Die hierbei gewonnenen Daten sollten die Grundlage aller weiteren Entscheidungen und der Rekultivierungsplanung liefern.

2 Standortsgutachten

2.1 Fragestellung und Untersuchungsumfang

Die wichtigsten Fragen, die mit Hilfe des Standortsgutachtens beantwortet werden sollten waren:

[7] Siehe hierzu den Beitrag von W. BURGER in diesem Band.

1. Wie ist die Qualität der Abdeckung hinsichtlich ihrer Eignung als Standort für Gehölzbestände einzustufen?

Eine Rekultivierung kann nur erfolgreich sein, wenn die Zielbestände dauerhaft etabliert werden können. Hierfür ausschlaggebend ist die Beschaffenheit der Rekultivierungsschicht, deshalb wurden die für den Wasserhaushalt und die Nährstoffversorgung wichtigen Bodenmerkmale mit folgenden Methoden erkundet:

Bohrstockproben

mit Handbohrer (Pürckhauer-Bohrer)

flächig in einem Raster von 20x20 m, in ausgewählten Bereichen 10x10m

- Bodenarten, Humusgehalt, Profilschichtung („Horizonte")
- Mächtigkeit der Bodenabdeckung
  Die Bohrtiefe wird mechanisch durch große Steine, unter Umständen auch durch hohe Lagerungsdichten begrenzt. Die ermittelte Mächtigkeit entspricht damit nicht in allen Fällen der gesamten tatsächlichen Mächtigkeit der Abdeckung, sondern nur der Bodenschicht soweit sie mit dem Bohrstock durchdrungen werden konnte.
- Mächtigkeit des potentiellen Wurzelraumes (physiologische Gründigkeit oder Durchwurzelbarkeit) und Begrenzungsfaktoren des Wurzelwachstums:
  - Steine
  - Dichte
  - Reduktion
  - Müll

Weiterhin wurden aufgenommen:
- Carbonatgehalt
- Dichte (geschätzt)
- Redoxmerkmale

Leitprofile

7 Profile =
ca. 1 Leitprofil/ha

- Bodenart und Steingehalt
- Durchwurzelungstiefe und –intensität
  Hier wurde vor allem die Durchwurzelung der Gehölze betrachtet.
- Trockenraumdichte (Labor)
- nutzbare Feldkapazität (Labor)
- gesättigte Wasserleitfähigkeit (Labor)
- bodenchemische Eigenschaften (Labor):
  - pH-Wert
  - C-Gehalt
  - N-Gehalt
  - P-Gehalt

daraus abgeleitet: Humusgehalt, C/N-Verhältnis

Auf Wald-, Sukzessions- und Ruderalflächen kann die Artenausstattung über ökologische Zeigerwerte Hinweise auf wichtige Standortsmerkmale geben. Deshalb wurde die spontane Vegetation des BA I flächendeckend kartiert; diese Leistung ist im üblichen Maßnahmenkatalog eines Standortsgutachtens nicht enthalten.

2. Welche Bedeutung kommt der vorhandenen Vegetation bei der Sickerwasserreduzierung zu?

Die Bestandsaufnahme der Gehölzbestände im Standortsgutachten erfasste

- die Struktur der Bestände,
- die Wüchsigkeit, auch im Vergleich zu Standorten der Umgebung
- die natürliche Verjüngung und
- die Bodendurchwurzelung.

Alle Einzeluntersuchungen zur qualitativen Beschreibung und Bewertung des Waldes auf der Deponie Neuenburg wurden an Robinien vorgenommen. Um darzustellen, ob sich die auf der Deponie wachsenden Robinien in ihrem Wuchsverhalten von Robinien auf ungestörten Waldstandorten unterscheiden, wurde das Höhen- und Dickenwachstum von Bäumen auf der Deponie mit dem von Bäumen aus dem nahegelegenen Rheinwald verglichen. Der Robinienbestand im Rheinwald (angepflanzt 1946) wurde als Referenzbestand (als ein normal bzw. durchschnittlich gut entwickelter Wald) ausgewählt.

Die Vegetation hat einen maßgeblichen Einfluss auf den Wasserhaushalt der Abdeckung. Entsprechende Literatur wurde ausgewertet und die Ergebnisse auf die Gehölzbestände in Neuenburg bezogen. Außerdem wurde beurteilt, ob sich offene Flächen in absehbarer Zeit natürlich bewalden oder ob Gehölze gepflanzt werden müssen.

3. In welchem Umfang gelangt über den Zutrittspfad „Niederschlag“ Sickerwasser in den Deponiekörper?

Hierzu wurde mit dem Programm HELP (Version 3.07D, BERGER 1999) der Wasserhaushalt der vorhandenen Abdeckung für die Jahre 1995, 1997 und 1998 modelliert. Die hierfür erforderlichen Eingangsdaten wurden im Zuge der Bodenerkundung in den Leitprofilen erhoben. Zum Vergleich wurden TASi-Oberflächenabdichtungen der Deponieklassen I und II anhand empirischer Daten modelliert. Die Ergebnisse der HELP-Modellierung wurden mit Daten aus forsthydrologischen Untersuchungen verglichen.

2.2 Ergebnisse des Standortsgutachtens: Boden

Insgesamt wurden 241 Bohrungen niedergebracht und 7 Leitprofile angelegt. Die Abdeckung des BA I ist, wie bei einem ungeplanten und ungeregelten Aufbau nicht anders zu erwarten war, äußerst inhomogen. Die Werte der untersuchten Bodeneigenschaften streuen über eine große Bandbreite.

Die Abdeckung besteht überwiegend aus (meist tonigen) Schluffen, (sandigem) Lehm sowie lehmigem Sand, insgesamt also für Rekultivierungszwecke geeignete Bodenarten. Allerdings

entsprechen mit Ausnahme eines Profils[8] im Nordteil die Böden der Abdeckung wegen ihrer hohen Steingehalte (bis 60 %) meist nicht den Eignungsanforderungen. Die Mächtigkeit der Abdeckung bis zum ersten Wurzelhindernis (Steinblöcke etc.) ist überwiegend hinreichend, sie entspricht jedoch nur auf etwa der Hälfte des BA I der heute gültigen Anforderung für Rekultivierungsschichten von mindestens 1 m.

Die in der forstlichen Rekultivierung als günstig erachteten Lagerungsdichten (Rohdichten) von ca. 1,4 g/cm³ werden außer in den Oberböden fast immer überschritten. Diese Tatsache wirkt sich nachteilig auf die Durchwurzelung und die nutzbare Feldkapazität des Wurzelraumes aus. Wirklich günstige Bodenbedingungen konnten nur dort angetroffen werden, wo geeignete Substrate beim Einbau nicht verdichtet wurden. Dies ist vor allem auf der Nordböschung in einem Leitprofil der Fall (Profil 3, siehe Abbildung 1).

Eine der wichtigsten Bodeneigenschaften auf Standorten ohne Grundwasseranschluss ist die nutzbare Wasserspeicherkapazität (Feldkapazität) des Wurzelraumes. Sie ist aufgrund des bindigen Feinbodens überwiegend mittel bis hoch. Bei der Beurteilung muss allerdings berücksichtigt werden, dass die Pflanzenwurzeln aufgrund von Verdichtungen oft nicht den gesamten potentiellen Wurzelraum erschließen können. Die nutzbare Feldkapazität der Leitprofile variierte sehr stark, sie lag zwischen 52 mm und 325 mm.

Die chemischen Eigenschaften der Böden (Nährstoffversorgung, pH-Wert) sind insgesamt als ausreichend bis gut einzustufen. Laboranalysen und die ökologischen Zeigerwerte der spontanen Vegetation decken sich.

2.3 Ergebnisse Bewuchs

Die Vegetation im BA I indiziert überwiegend „gute", d.h. ausreichend nährstoff- und basenversorgte sowie frische Standortbedingungen, was die Ergebnisse der Bodenbewertung weitgehend bestätigt. Insgesamt überwiegen - vor allem im Südteil - ruderale und halbruderale Bestände, die noch deutlich auf den relativ kurzen Zeitraum seit dem Aufbringen der Abdeckung hinweisen. Im nördlichen Teil ist die Sukzession in Richtung Waldbestand weiter vorangeschritten, sowohl was die Flächendeckung als auch die Artenzusammensetzung anbelangt. Neben den Gehölzen überwiegen hier in der Krautschicht Arten der Waldsäume und –verlichtungen. „Echte Waldarten", die ein ausgereiftes Waldökosystem anzeigen, sind jedoch kaum vertreten.

Eine Besonderheit war das Vorkommen einiger gefährdeter Pflanzenarten, vor allem auf der relativ steilen südexponierten Böschung des BA I.

Waldbestände

Das Alter der Waldbestände betrug zwischen 8 und 25 Jahren. Aus der Altersverteilung war zu erkennen, dass der BA I Zug um Zug mit der Fertigstellung einzelner Bauabschnitte abgedeckt und bepflanzt wurde. Entsprechend den Altersunterschieden, der Baumartenzusammensetzung und der Lage (Plateau oder Böschungen) wurde die Waldfläche in acht Teilareale (Bestände) gegliedert.

---

[8] Da der Steingehalt nicht mit dem Bohrstock ermittelt werden kann, muss aus den Leitprofilen auf die umgebenden Flächen geschlossen werden.

In den bewaldeten Flächen kommen mehr als 20 Baum- und Straucharten vor. Dominiert werden die Bestände von der angepflanzten Robinie (*Robinia pseudacacia*). Die Robinie ist ein Rohbodenpionier mit einem intensiven Wurzelwachstum, wodurch sie hervorragende bodenfestigende Eigenschaften besitzt. Infolge hoher Stickstoffanreicherung bestimmt bzw. verändert die Robinie die Naturvegetation meist stark. Durch ihre sehr erfolgreiche Vermehrung über Wurzelbrut gilt sie als unduldsam und kaum mehr zu beseitigen.

Sowohl hinsichtlich des Höhen-, vor allem aber des Dickenwachstums zeigen die Robinien auf der Deponie eine im Vergleich zum benachbarten Auenwald überlegene Wuchsleistung. Dass die Bäume auf der Deponie schneller wachsen, lässt sich unter Berücksichtigung der bodenkundlichen Ergebnisse nicht auf eine Überlegenheit des Standorts zurückführen. Vielmehr spiegelt sich hier die Konkurrenzsituation zu Nachbarbäumen wider. So wurde der Robinienbestand im benachbarten Rheinwald sehr viel dichter angepflanzt als die Aufforstungen auf der Deponie. Die früh eintretende Konkurrenz zwischen den einzelnen Baumindividuen hat im Altwald das Dickenwachstum gehemmt. Dass das Höhenwachstum bis zum Alter von etwa 20 Jahren sehr kräftig ist und dann allmählich nachlässt, zeichnet sich in beiden Beständen gleich ab. Insgesamt war das Wachstum der Robinienbestände auf der Deponie Neuenburg, verglichen mit dem Referenzbestand, als gut einzustufen. Diese bisher guten Wuchsleistungen dürfen allerdings nicht über die auf großen Flächen ungünstigen Bodenbedingungen hinwegtäuschen, da die Robinie als Pionierbaumart auch mit schwierigen Standortsverhältnissen zurecht kommen kann.

Die Waldbestände sind mehrschichtig aufgebaut (Baum-, Strauch- und Krautschicht). Wie Untersuchungen zur Grundwasserneubildung unter Wald belegen, sind derart strukturierte Bestände im Hinblick auf die Minimierung der Sickerwassereinträge sehr gut zu bewerten, da sie die höchsten Gesamtverdunstungen aufweisen (Interzeption und Transpiration). Unter günstigen Bodenverhältnisse sind sie auch in ihrem Wurzelaufbau in der Tiefe strukturiert und können dem Bodenwasserspeicher aus größeren Tiefen Wasser entziehen.

Durchwurzelung

Die Durchwurzelung in den einzelnen Profilen ergibt ein sehr unterschiedliches Bild. Die Durchwurzelungstiefe schwankt zwischen 0,4 m und 1,2 m. Hinsichtlich der Durchwurzelungsintensität sind die Unterschiede ebenfalls sehr groß. Die sandigen Substrate werden meist besser durchwurzelt (Abbildung 1: Profil Nr. 3). Bei den bindigeren Lehmböden ist durch das Aufbaggern ein künstliches Makrogrobgefüge entstanden. Hier folgt die Durchwurzelung fast ausschließlich den künstlichen Gefügegrenzflächen, während das Innere der Aggregate noch nicht aufgeschlossen wird (Abbildung 1: Profil Nr. 4). Die Unterschiede in der Durchwurzelung spiegeln demnach die verschiedenartige Beschaffenheit der zur Abdeckung verwendeten Böden ebenso wider, wie beim Einbau bzw. späterer Befahrung verursachte unterschiedlich starke Bodenverdichtungen.

Die Wurzelaufgrabungen zeigen, dass auch in künftigen Waldgenerationen Pionierbaumarten eine Rolle spielen müssen, besonders in Plateaulagen, wo die Böden stark verdichtet sind. Die Wurzelaufgrabungen weisen hinsichtlich der Besiedelbarkeit der Substrate durch Bäume auf zum Teil stark wechselnde Verhältnisse hin. Es wurden keine Flächen angetroffen, die für einen Anbau von Wald nicht geeignet sind. Zur Sickerwasserminimierung kann die Robinie unter den gegebenen Bodenverhältnissen durch die tendenziell gut ausgeprägte Durchwurzelung einen wertvollen Beitrag leisten.

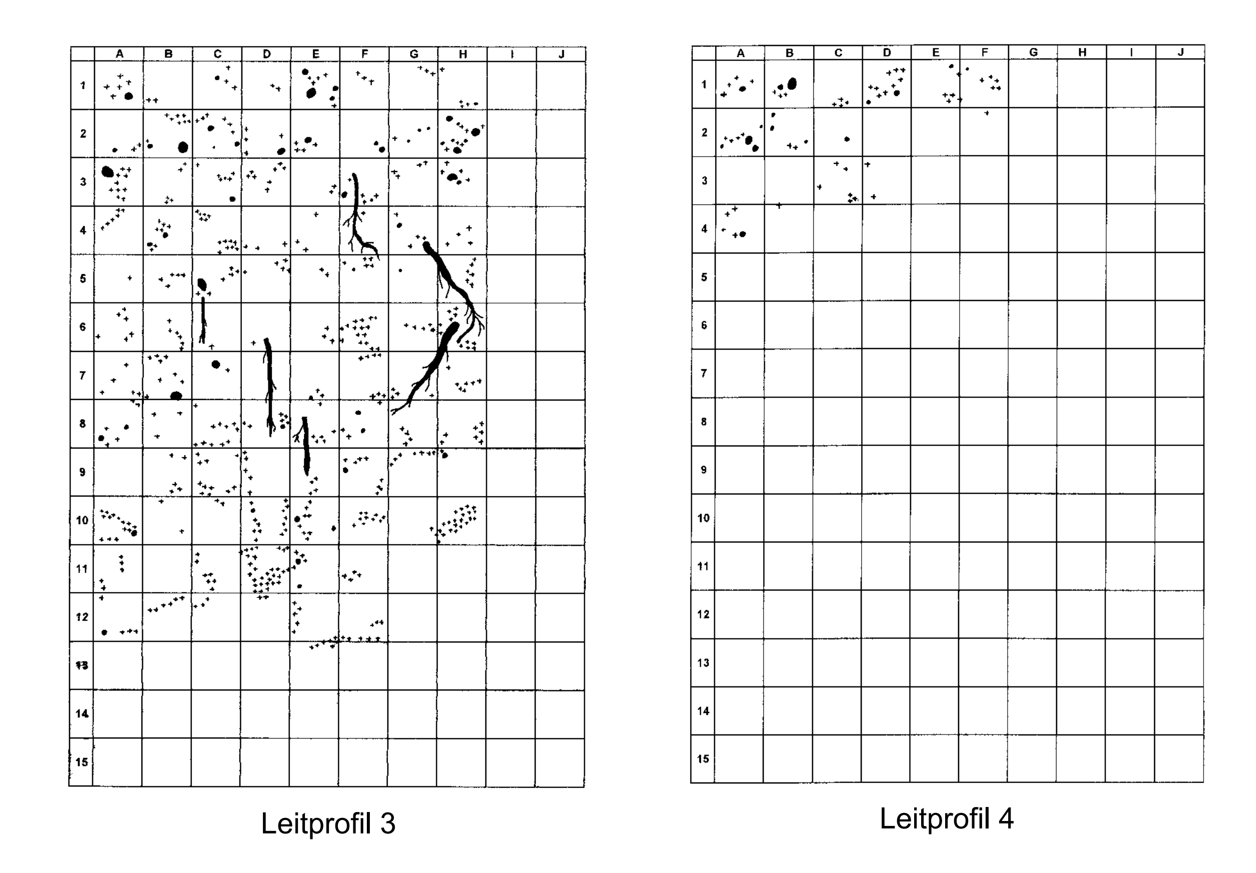


Abbildung 1: Wurzelbilder von zwei Leitprofilen, links das Profil mit den günstigsten Bodeneigenschaften, rechts ein Profil mit stärker verdichtetem Boden. Rasterweite: 10 cm

2.4 Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodellierung

Der für den Wasserhaushalt der Deponie maßgebliche Parameter ist die Versickerung aus der Abdeckung. Die Modellierung ergab für die Jahre 1995, 1997 und 1998 Sickerwassermengen meist zwischen 200 und 250 mm jährlich. Demnach werden ca. 67 – 72 % des gemittelten Jahresniederschlags verdunstet[9]. Lediglich für Profil Nr. 3 wurde eine deutlich geringere Sickerwassermenge von durchschnittlich 124 mm berechnet, hier werden demnach 83 % der Niederschläge zurückgehalten.

Dieses Ergebnis ist als Konsequenz aus dem sehr günstigen Aufbau des Profils Nr. 3 zu sehen. Es hebt sich hinsichtlich Lagerungsdichte, Gründigkeit und Durchwurzelung bis in 140 cm Tiefe (siehe Abbildung 1) von den übrigen Leitprofilen ab. Die tiefreichende Verdunstungszone und die günstigen physikalischen Eigenschaften bedingen eine hohe Evapotranspiration und Wasserspeicherkapazität, wodurch die Versickerung reduziert wird.

Die Sickerwassermengen der drei modellierten Jahre unterscheiden sich entsprechend der Niederschlagsverteilung bzw. -mengen. Für das trockenste Jahr 1997 werden die niedrigsten, für das nasse Jahr 1995 die höchsten Sickerwasserraten modelliert.

Die Modellierung für eine Oberflächenabdichtung mit einfacher mineralische Dichtung (kf = $5*10^{-9}$ m/s) entsprechend der TA Siedlungsabfall ergab durchschnittliche Sickerwasserraten

9 Der Oberflächenabfluss spielt mit max. 15 mm/a keine bedeutende Rolle im Wasserhaushalt der Abdeckung.

zwischen 36 und 56 mm jährlich. Ein Aufbau mit mineralischer Dichtung mit aus der Praxiserfahrung resultierenden höheren Wasserleitfähigkeit von $5x10^{-8}$ m/s ist weit weniger effektiv. HELP berechnete hier Sickerwassermengen zwischen durchschnittlich 121 und 157 mm pro Jahr.

Da das HELP-Modell (Version 3.07) als Vegetationsdecke lediglich Grasbestände vorsieht, wurde davon ausgegangen, dass das Modell die höhere Gesamtverdunstungsleistung gut strukturierter und stufig aufgebauter Gehölzbestände wie in Neuenburg unterschätzt und die modellierten Sickerwassermengen nach unten korrigiert werden müssten. Zu berücksichtigen ist in diesem Zusammenhang weiterhin, dass im (relativ kurzen) Modellierungszeitraum im Vergleich zum langjährigen Mittel eher überdurchschnittlich hohe Niederschläge zu verzeichnen waren.

3 Rekultivierungskonzeption

3.1 Ziel

Als Fazit des Standortgutachtens kann zusammengefasst werden: Das im Betriebsabschnitt I zur Rekultivierung verwendete Material (Erdaushub und erdreicher Bauschutt) ist aufgrund hoher Steingehalte und starker Verdichtung überwiegend wenig geeignet und besitzt oft ungünstige physikalische Eigenschaften. Nur im Bereich der bewaldeten nordexponierten Böschungen sind günstige Bodenbedingungen geschaffen worden. Die Wasserhaushaltsmodellierung ergab für diese Standorte folgerichtig deutlich niedrigere Absickerungsraten.

Aus diesem Ergebnis wurde im Einvernehmen mit der Genehmigungsbehörde die Zielvorgabe für die Konzeption der Rekultivierungsplanung abgeleitet:

1. Die Rekultivierungsplanung verfolgt das Ziel, eine **Reduzierung der Absickerung durch hohe Verdunstung** auf natürlichem Weg zu realisieren. Hierzu ist auf möglichst großer Fläche des Betriebsabschnitts I eine Rekultivierungsschicht mit Standortbedingungen zu schaffen, die dem günstigsten Profil mit den niedrigsten modellierten Absickerungsraten des Ist-Zustandes entsprechen. Die Wasserhaushaltsfunktion der Rekultivierungsschicht erfordert, ebenso wie die Wiedereingliederung der Deponie in die Umgebung, eine weitgehende **Wiederbewaldung** der Fläche.
2. Die Planung soll in einem ersten Schritt großmaßstäblich Bereiche des Betriebsabschnitts I ausweisen, die unter dieser Vorgabe den Anforderungen entsprechen, nachzubessern oder gänzlich neu zu gestalten sind. Von besonderer Bedeutung sind in diesem Zusammenhang folgende Fragen:

a) Für welche Bereiche des BA I ist ein Bodenauftrag zur Verbesserung der Rekultivierungsschicht erforderlich, um die Vorgabe zum Wasserhaushalt zu erfüllen?

b) Für welche Bereiche kommt ein Bodenauftrag unter Abwägung aller in Frage kommender Kriterien (vorhandener Waldbestand, Böschungsneigung, Raumbedarf u.a.) tatsächlich in Betracht?

c) Die Deponiekuppe des BA I ist bislang noch nicht rekultiviert worden. Hier muss die Rekultivierungsschicht vollständig neu gestaltet werden.

3. Aufbauend auf den Ergebnissen der Bestandsaufnahme von Abdeckung und vorhandener Vegetation werden Vorschläge zur Optimierung von Böden und Bewuchs gemacht, um

eine Reduzierung der Absickerung auf natürlichem Wege, d.h. durch eine hohe Evapotranspiration und nicht durch technische Einrichtungen zur Oberflächenabdichtung zu realisieren.

4. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass auf dem größten Teil der Fläche Wald entstehen bzw. erhalten werden soll. Es sind deshalb Planungen zur Entwicklung und Erhaltung von standortgerechten und im Hinblick auf die Wasserhaushaltsfunktion möglichst optimal gestalteten Waldbeständen vorzulegen.

3.2 Vorgehensweise

3.2.1 Herstellen der Rekultivierungsschicht als Wasserhaushaltsschicht

Rekultivierungsbereiche

Auf Grundlage der formulierten Ziele wurden im ersten Planungsschritt anhand untenstehender Bewertungskriterien folgende Bereiche ausgewiesen:

I. Bereiche, für die Nachbesserungen aufgrund der Bewertung des Wasserhaushalts und der Durchwurzelbarkeit erforderlich sind.

II. Der Kuppenbereich, der bisher nicht rekultiviert war, musste von Grund auf neu gestaltet werden.

III. Rekultivierte Bereiche, die bereits jetzt die gestellten Anforderungen hinreichend erfüllen.

Bewertungskriterien

Die vorhandene Abdeckung (Rekultivierungsschicht) wurde in der Bestandsaufnahme im Hinblick auf die Funktionen **Pflanzenstandort** und **Wasserhaushalt**, hier: Minimierung der Absickerung bewertet. Diese beiden Funktionen können nicht unabhängig voneinander gesehen werden (siehe WATTENDORF & BÖNECKE 1999).

Zur Auswahl der ertüchtigungsbedürftigen Bereiche wurden insbesondere als Kriterien die

- (nutzbare) Wasserspeicherkapazität und die
- Durchwurzelbarkeit bzw. tatsächliche Durchwurzelung

herangezogen, da sie den Wasserhaushalt und die Qualität der Abdeckung als Pflanzenstandort maßgeblich beeinflussen. Andere Standorteigenschaften (chemische Beschaffenheit usw.) spielen in Neuenburg im Vergleich hierzu eine untergeordnete Rolle.

Als realistische Zielvorgabe bei der Gestaltung der Rekultivierungsschicht wurden die Merkmale von Leitprofil 3 der Bestandsaufnahme herangezogen, da dieses Profil die mit Abstand geringsten modellierten Absickerungsraten aufweist:

nutzbare Wasserspeicherkapazität (nWSK)	325 mm
Durchwurzelungstiefe (⇒ Tiefe der Verdunstungszone)	140 cm

Entsprechend der unter Kapitel 3 formulierten Fragestellung werden demnach eine **nutzbare Wasserspeicherkapazität von circa 250 - 300 mm** und eine **durchwurzelbare Tiefe von circa 120 - 140 cm** als Zielgrößen für die Einstufung des Ertüchtigungsbedarfs angenommen.

Handlungsbedarf

Aus den zuvor dargestellten Zielvorgaben wurden drei Bedarfsstufen abgeleitet, aus denen ersichtlich wird, inwieweit die Anforderungen an eine optimierte Rekultivierungsschicht bereits im Ist-Zustand erfüllt werden (Zielerfüllungsgrad).

1. kein Bedarf	nWSK überwiegend > 200 mm, stellenweise 120 – 180 mm potentielle Durchwurzelungstiefe überwiegend mindestens 70 – 120 cm
2. Bedarf angezeigt	nWSK überwiegend > 120 mm, aber oft < 180 mm potentielle Durchwurzelungstiefe überwiegend mindestens 70 – 120 cm
3. vordringlicher Bedarf	nWSK auf ganzer Fläche oder überwiegend < 120 mm

Diese Bedarfsstufen wurden in einem ersten Bewertungsschritt anhand der Ergebnisse der Bestandsaufnahme den einzelnen Teilbereichen des BA I zugeordnet.

Bei der Festlegung der ertüchtigungsbedürftigen Bereiche wurde die südliche Böschung nicht berücksichtigt, sie soll als trockener Offenlandbiotop erhalten bleiben. Dies bedeutet jedoch, dass zukünftig eventuell aufkommender Baumwuchs im Zuge von Pflegemaßnahmen entfernt werden sollte.

Einschränkungen

In einem zweiten Bewertungsschritt war zu prüfen, inwieweit die erforderliche Ertüchtigung der Rekultivierungsschicht sinnvoll erscheint und mit vertretbarem Aufwand tatsächlich realisierbar ist. Als mögliche Einschränkungen bei der Neugestaltung der Rekultivierungsschichten wurden in Betracht gezogen:

• gut strukturierter Bewuchs mit stufigem Aufbau	Es kann Rücksicht auf die vorhandenen ca. 20-jährigen Waldbestände (überwiegend Robinie) genommen werden, die stellenweise bereits sehr gut vertikal strukturiert sind und eine hohe Transpirationsleistung erwarten lassen.
• Böschungsneigung	Nach BRAUNS et al. (1997) sind locker geschüttete Substrate unter Wald bis zu Böschungsneigungen von 1:3 standsicher. Bei Böschungsneigungen über 1:3 muss dies für den Einzelfall geprüft und nachgewiesen werden.
• Raumbedarf am Böschungsfuß	Eine Aufhöhung der vorhandenen Böschungen bedingt die Verlegung des Böschungsfußes. Bestehende Infrastruktureinrichtungen können hierbei begrenzend wirken.
• Sichtschutzfunktion	Entlang der äußeren Deponieränder kann der vorhandene Wald aus Sichtschutzgründen belassen werden

Maßnahmen

Im nächsten Planungsschritt wurden, ausgehend von der Bedarfseinstufung und unter Berücksichtigung der Einschränkungen, die zu ertüchtigenden Bereiche sowie die Maßnahmen festgelegt. Auch dieser Schritt wurde in enger Abstimmung zwischen Planern, Auftraggeber, technischer Fachbehörde und Genehmigungsbehörde vollzogen.

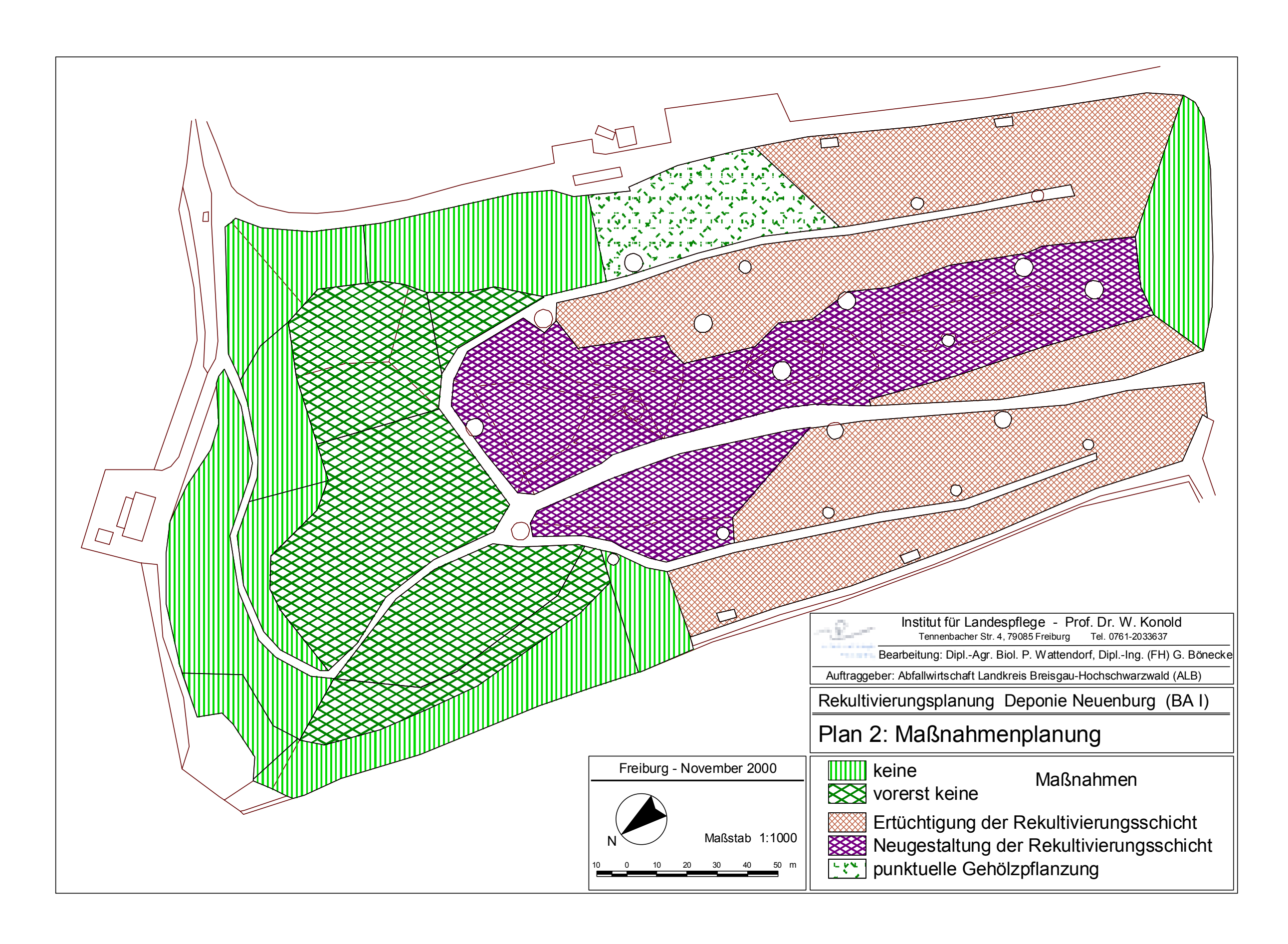


Abbildung 2: Maßnahmenplan des Rekultivierungskonzeptes

Folgende Maßnahmen sind im Hinblick auf die eingangs formulierte Zielsetzung der Planung vorgesehen und den Rekultivierungsbereichen RB I bis RB IV zugeordnet (siehe Abbildung 2):

Rekultivierungsbereich I: Hier werden Nachbesserungen ausgeführt, indem die vorhandene Abdeckung mit geeignetem Bodenmaterial verstärkt wird. Ausgehend von den Zielgrößen (s.o.) wurden Defizite für die östliche (Bezug: Leitprofil) und westliche Böschung (Bezug: Leitprofil) ermittelt und hieraus die Dimensionierung des erforderlichen Bodenauftrags abgeleitet. Da aus unterschiedlichen Gründen der keine unbeschränkte Aufhöhung der Böschung möglich war, wurde die Verwendung von hochwertigen Bodenmaterial mit einer nutzbaren Feldkapazität nach AG BODEN (1994) von mindestens 25 Vol-% vorgesehen. Es kamen deshalb vor allem tonige, sandige oder lehmige Schluffe sowie schluffige Sande in Frage. Die zum Erreichen der Zielvorgaben notwendige Überdeckungshöhe mit solchem Material wurde für die westliche Böschung auf mindestens 70 und die östliche Böschung auf mindestens 50 cm beziffert.

Die berechneten Werte der nutzbaren Wasserspeicherkapazität sowie eine tiefreichende Durchwurzelung werden nur bei unverdichtetem Einbau mit möglichst geringer Lagerungsdichte erreicht. Der Einbau des Bodens auf die vorhandene Abdeckung sollte deshalb mit geringstmöglicher Verdichtung erfolgen.

Rekultivierungsbereich II: Die bisher noch nicht rekultivierte Deponiekuppe wird mit einer Abdichtung versehen, welche Absickerungen aus der Rekultivierungsschicht mindestens solange ableitet, bis die Vegetation ihre Wasserhaushaltsfunktion optimal erfüllen kann. Diese Abdichtung besteht aus einer HDPE-Kunststoffdichtung und einer Entwässerungsschicht zur Ableitung des Sickerwassers. Die Mächtigkeit der neu zu gestaltenden Rekultivierungsschicht beträgt 2 m. Hierzu sind geeignete Substrate und geeignete verdichtungsarme Einbauverfahren wie in Rekultivierungsbereich I zu verwenden.

Rekultivierungsbereich III: In diesem Rekultivierungsbereich sind vorläufig keine Maßnahmen vorgesehen, da bereits ein gut ausgebildeter Waldbestand vorhanden ist. Nach Ausführung der Maßnahmen in den Rekultivierungsbereichen I, II und IV wird geprüft, ob eine Ertüchtigung erforderlich wird.

In einer Teilfläche sollten die vorhandenen lückigen Robinienbestände durch punktuelle Bepflanzung verbessert werden (**Rekultivierungsbereich IV**).

3.2.2 Bepflanzungskonzept

Die Bepflanzung der neu rekultivierten Bereiche orientiert sich an den Anforderungen des Wasserhaushalts und der in Neuenburg zu erwartenden Standortbedingungen. Es werden lichte, gut abgestufte Waldbestände mit ausgeprägter Kraut- und Strauchschicht angestrebt. Als Zielbestände sind Stieleichen- und Kiefernmischwälder vorgesehen.

Es sollen sieben Vorwald-Typen für unterschiedliche Standorte, die schnell möglichst hohe Evapotranspirationsraten erreichen, gepflanzt werden. Im Schutz der Vorwälder werden in 20-30 Jahren die Zielwälder etabliert. Die Bestände müssen durch Zäune vor Wildverbiss geschützt werden.

Als Zielwälder für die neu rekultivierten Bereiche sind sechs standortabhängig zusammengesetzte Mischbestände vorgesehen, die vorhandenen von Robinie dominierten Wälder werden durch Pflegemaßnahmen zu einem weiteren Zielwaldtyp entwickelt.

4 Qualitätssicherung der Erdbauarbeiten bei der Ausschreibung

Die wichtigsten Aspekte bei der Qualitätssicherung der Erdbauarbeiten bei der Ausschreibung waren die Beschaffung geeigneten Bodenmaterials und die Festlegung des Einbauverfahrens. Die Ausführbarkeit der gesamten Maßnahme hing letztlich an der Beschaffung geeigneten Bodenmaterials. Ein Teil des erforderlichen Bodens konnte bereits vorab durch den Auftraggeber gesichert werden. Die Verfügbarkeit von geeignetem Bodenmaterial sollte für die Auftragsvergabe eine ausschlaggebende Rolle spielen. Deshalb wurden folgende Festlegungen getroffen:

1. Die Eigenschaften des zu liefernden Bodenmaterials werden in einem Qualitätssicherungsplan „Erdarbeiten“ als Anlage zum Leistungsverzeichnis definiert.

2. Der Unternehmer benennt die Entnahmestellen von geeignetem Bodenmaterial bei Abgabe des Angebots. Vor Auftragsvergabe sollten alle Nachweise über die Bodenqualität und –verfügbarkeit vorgelegt werden werden.
3. Das Bodeneinbauverfahren sollte im Angebot genau beschrieben werden.

Im Qualitätssicherungsplan „Erdarbeiten“ und im Leistungsverzeichnis wurden diese Festlegungen konkretisiert:

zu 1: Bodenmaterial

- **Unterbodenmaterial** mit Anteil Schluffkorn ≥ 40 Vol-% und Anteil Tonkorn ≤ 20 Vol-% aus den Bodengruppen 6 (bindiger Boden) oder Bodengruppe 8 (starkbindiger Boden) nach DIN 18915
- Humus (organische Substanz) < 2 Vol-%; ohne unverrottete oder nur teilweise verrottete organischen Anteile wie Pflanzenreste, Kompost, Holzhäcksel u.ä.
- Steingehalt (Korn-Ø > 2 mm) maximal 10 Vol-%
- maximale Korngröße (Größtkorn) ≤ 100 mm
- Das Bodenmaterial muss die natürlichen Nährstoffe enthalten.
- Schadstoffgehalte und Eluatkonzentrationen dürfen die in Anhang 5 der DepVO definierten Grenzwerte nicht überschreiten.
- **Oberbodenmaterial** (Mutterboden DIN 19731) mit den gleichen Eigenschaften wie der Unterboden, jedoch mit Humusgehalt > 2 und < 15 Vol-%.

zu 2: Nachweis der Verfügbarkeit

- **Vorab-Prüfung des Bodenmaterials** in der Entnahmestelle durch den Bodengutachter des Auftraggebers
- Boden ist nach Möglichkeit an einer oder nur wenigen **Entnahmestellen** zu gewinnen, die eine möglichst große Menge einheitlichen Materials liefern, um den Kontrollaufwand zu reduzieren
- vom Auftragnehmer gegebenenfalls zu liefernden **Nachweise**: Prüfgrößen sind Körnung (Sieblinie), Humusgehalt, Schadstoffgehalte, Bodenreaktion, Kalkgehalt
- Eine laufende **Eingangskontrolle** des Materials während des Baubetriebes war vorgesehen.

zu 3: Einbauverfahren

Die Ertüchtigung der Rekultivierungsschicht auf den Böschungen sollte in folgenden Arbeitsschritten erfolgen:

- Nach Entfernen des Bewuchses wird der Oberboden mit den darin enthaltenen Pflanzenteilen (Wurzeln usw.) mit einer Stockfräse aufgefräst und mit der Raupe abgeschoben.
- Die nunmehr neue Bodenoberfläche wird unmittelbar vor dem nächsten Arbeitsschritt bis in den Untergrund tief gelockert (ca. 60 cm).
- Der Untermaterial wird **unverdichtet eingebaut**: Das Material ist beispielsweise in der Gesamtmächtigkeit einem Zug bis zur geplanten Endhöhe **Vor-Kopf mit Raupe** einzuschieben. Es dürfen keine Zwischenschichten entstehen. Das exakte Einhalten der

geplanten Endhöhe ist mit geeigneten Maßnahmen (GPS-Steuerung etc.) sicher zu stellen und wird von der Bauleitung laufend kontrolliert. Die Anzahl der Befahrungen ist auf ein Minimum zu begrenzen, insbesondere muss **kein Planum** der Bodenoberfläche hergestellt werden. Alternative Verfahren konnten angeboten werden.

- Die aufgetragene Bodenschicht wird mit einer Planierraupe mit Heckaufreißer, Arbeitsrichtung quer zum Hang, Arbeitstiefe ca. 60 cm **flächig aufgelockert**. Die Bodenlockerung darf erst unmittelbar vor dem Oberbodenauftrag ausgeführt werden. Es ist ein Gerät mit möglichst geringer Pressung (Bodendruck) zu wählen, die Befahrung ist auf das erforderliche Mindestmaß zu beschränken.
- Der auf der Baustelle zwischengelagerte Oberboden wird flächig in einem Arbeitsgang mit leichter Raupe mit breiten Ketten verteilt.
- Anschließend **Lockern und Einarbeiten** in den Untergrund bis ca. 30 cm Tiefe mit angehängter Scheibenegge oder ähnlichem Gerät.

Grundsätzlich sollte gelten:

- Alle **Bodenarbeiten** dürfen nur bei **trockener Witterung** und **umlagerungsfähigem Zustand des Bodenmaterials** (Prüfung nach DIN 19731) nach vorhergehender Prüfung und gegebenenfalls Freigabe durch den Sachverständigen des Auftraggebers durchgeführt werden.

Das Vor-Kopf-Einschieben mit einer leichten Raupe war in Vorgesprächen als Kompromiss für eine wirtschaftlich sinnvolle und unter ökologischen Aspekten akzeptable verdichtungsarme Einbaumethode vereinbart worden. Eine Baufirma bot jedoch statt dessen den verdichtungsfreien Einbau mit dem Löffelbagger für die Böschungen in Neuenburg zu einem vergleichbaren Preis an.

5 Literatur

AG BODEN (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Aufl., 392 S., Hannover

BERGER, K. (1999): Validierung und Anpassung des Simulationsmodells HELP zur Berechnung des Wasserhaushalts von Deponien für deutsche Verhältnisse, 557 S., Berlin

BRAUNS, J., KAST, K., SCHNEIDER, H., KONOLD, W., WATTENDORF, P. & LEISNER, T. (1997): Forstwirtschaftliche Rekultivierung von Deponien mit TA Siedlungsabfallkonformer Oberflächenabdichtung, Handbuch Abfall Band 13, 97 S. + Anhang, Karlsruhe

DIN 18915: Vegetationstechnik im Landschaftsbau – Bodenarbeiten (1990)

DIN 19731: Bodenbeschaffenheit – Verwendung von Bodenmaterial (1998)

TASi (1993): Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Siedlungsabfall), Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen, Bundesanzeiger Jahrg. 45, Nummer 99a, Hrsg. v. Bundesministerium der Justiz

REIF, A. (1996): Die Vegetation der Trockenaue am Oberrhein zwischen Müllheim und Breisach, Ber. Naturf. Ges. Freiburg i. Br. 84/85: 81 - 150

WATTENDORF, P. & G. BÖNECKE (1999): Rekultivierung der Kreismülldeponie Neuenburg – Betriebsabschnitt 1-, Bestandsaufnahme und Bewertung, unv. Gutachten, Institut für Landespflege, Freiburg

WATTENDORF, P. & G. BÖNECKE (2000): Rekultivierung der Kreismülldeponie Neuenburg – Betriebsabschnitt 1-, Rekultivierungsplanung, unv. Gutachten, Institut für Landespflege, Freiburg

Anschriften der Referenten

Dr.-Ing. Andreas Bieberstein
Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik
Universität Karlsruhe
Postfach 6980
76128 Karlsruhe
andreas.bieberstein@bau-verm.uni-karlsruhe.de

Dipl.-Ing. Peter Bothmann
Landesanstalt für Umweltschutz
Griesbachstr. 1
76185 Karlsruhe
peter.bothmann@lfuka.lfu.bwl.de

Dipl.-Ing. Fritz Braun
Bau- und Umwelttechnik
Sasbacher Str. 7
79111 Freiburg
fritz.braun@t-online.de

AR Wolfgang Burger
Regierungspräsidium Freiburg
Tel.: 0761/208-2113
Wolfgang.Burger@RPF.BWL.de

Dr. Otto Ehrmann
Bodenbiologie
Münster 12
97993 Creglingen
otto.ehrmann@gmx.de

Dipl.-Ing. Michael Koser
Umweltwirtschaft GmbH
Friolzheimer Str. 3
70499 Stuttgart
michael.koser@uw-d.de

Dr. Ulrich Maier-Harth
Fachgebiet Deponiebau, Abt. Boden / Grundwasser
Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz
Postfach 10 02 55
55133 Mainz
ulrich.maier-harth@lgb-rlp.de

Dipl.-Ing. Holger Reith
Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik
Universität Karlsruhe
Postfach 6980
76128 Karlsruhe
holger.reith@bau-verm.uni-karlsruhe.de

Dipl.-Ing. (FH) Gerhard Schaber-Schoor
Forstliche Versuchsanstalt -Abteilung Landespflege-
Wonnhaldestr. 4
79100 Freiburg
gerhard.schaber-schoor@forst.bwl.de

Dr. Peter Wattendorf
Institut für Landespflege /Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Tennenbacher Str. 4
79106 Freiburg
peter.wattendorf@landespflege.uni-freiburg.de